



Paulo Jorge Bilro
Machado

**Avaliação da Resistência
Estrutural de Juntas Soldadas
de Um Quadro de Uma Bicicleta**

Dissertação de Mestrado
em Engenharia de Produção

Dezembro 2010

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer à Escola Superior de Tecnologia de Setúbal por ter tornado possível a realização deste projecto no âmbito do Mestrado de Engenharia de Produção, cedendo as suas instalações e equipamento disponível.

Quero também agradecer à empresa OMS – Serviços de Programação Lda, nomeadamente ao seu director geral Sr. Orlando Martins e ao Eng. Rui Duarte pela oportunidade e pelo apoio prestado que tornaram possível a realização deste projecto.

Quero também agradecer ao Professor Ricardo Cláudio e ao Professor Aníbal Valido (orientador e co-orientador do projecto respectivamente), por toda a ajuda e pelo facto de se demonstrarem sempre disponíveis no encaminhamento do projecto e na resolução de alguns problemas e dúvidas que foram surgindo.

Gostaria também de deixar um agradecimento à Eng^a. Verónica Frias e à Eng^a. Márcia de Carvalho pela ajuda que disponibilizaram e pelos conhecimentos transmitidos.

Por último, um especial agradecimento aos familiares e amigos por todo o incentivo, amor, compreensão, paciência e entusiasmo com que me apoiaram no decorrer do projecto.

A todos eles um grande Obrigado.

Resumo

Em algumas situações industriais, é necessário demonstrar que um determinado produto cumpre com os requisitos de qualidade mesmo antes de este ser produzido. Neste caso é necessário verificar que uma nova geometria de quadro de bicicleta diferente do habitual produzido por um determinado processo automatizado de soldadura, cumpre os requisitos estruturais impostos pela norma internacional EN14766. Contudo, tendo em conta o nível de automação utilizado, é inviável a construção de pelo menos um quadro de bicicleta para a realização de ensaios. Foi assim proposto, numa primeira fase de validação do processo de soldadura a realização de ensaios de fadiga utilizando provetes. Este trabalho apresenta uma metodologia para a verificação de juntas soldadas tendo como referência os requisitos definidos pela norma EN14766 em termos de resistência à fadiga, através da realização de ensaios em provetes. O quadro da bicicleta foi analisado através do método dos elementos finitos de acordo com as cargas e constrangimentos definidos na norma EN14766. Com a análise deste modelo foi possível identificar quais as juntas críticas, bem como as cargas que nestas actuam. Foi desenvolvido um sistema de amarração para uma máquina de ensaios servo hidráulica uniaxial de modo a ser possível a aplicação de cargas axiais e momentos flectores. Foram realizados ensaios de fadiga em alguns provetes com a geometria em H e os resultados obtidos demonstraram que o processo de soldadura cumpre os requisitos definidos pela norma EN14766 relativamente à resistência à fadiga.

Palavras chave: Ensaios de Fadiga, Norma EN14766, Soldadura, Método de Elementos Finitos.

Abstract

In many industrial situations, it is necessary to prove that a certain product meets quality requirements even if it is not yet produced. For the present case, it is necessary to verify that a bike frame geometry, different from the conventional, and built using an automated weld procedure, meets the structural requirements imposed by the international standard E14766. However, due to the extent of automation required, it is impracticable to produce at least one bike frame in order to test it. For preliminary validation proposes and to optimize welding parameters, it was proposed to perform tests on specimens. This work presents a procedure to verify if the welded joints meet the requirements of EN14766 standard in terms of fatigue strength, by testing specimens. The bike frame geometry was analysed using the finite element method with the loads and constrains defined by EN14766 standard. From this model it was possible to identify which joins were critically loaded and their respective acting loads. A special gripping device was designed for a single axis servo-hydraulic testing machine in order to apply normal loads and bending moments similar to the ones calculated. Several H shaped welded specimens were fatigue tested and the results shown that this automated welding procedure is able to meet EN14766 standard requirements in terms of fatigue resistance.

Key words: Fatigue testing, EN14766 Standard, Weld, Finite Element Method.

Índice

Agradecimentos	ii
Resumo.....	iii
Abstract.....	iv
Índice.....	v
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Siglas e Acrónimos	xv
Lista de Símbolos.....	xvi
Capítulo 1	1
Introdução e Objectivo	1
1.1.Introdução	2
1.2.Objectivos.....	2
Capítulo 2	3
Soldadura	3
2.1.Processos de Soldadura	4
2.1.1. Soldadura TIG	5
2.1.2. Soldadura MIG/MAG	10
2.2.Soldadura Al 6061-T6	16
2.3.Defeitos de Soldadura	20
2.3.1. Falta de Penetração	22
2.3.2. Falta de Fusão	22
2.3.3. Defeitos de Forma.....	23

2.3.4. Fendas	24
2.3.5. Porosidades	27
2.3.6. Inclusões sólidas	28
2.4. Consequência dos defeitos da soldadura no comportamento à fadiga	29
2.4.1. Falta de Penetração	30
2.4.2. Falta de Fusão	31
2.4.3. Defeitos de Forma	31
2.4.4. Fendas	32
2.4.5. Porosidade	32
2.4.6. Inclusões Sólidas	34
Capítulo 3	36
Fadiga de Materiais	36
3.1. Fenómeno de Fadiga	37
3.2. Dimensionamento à Fadiga	41
3.3. Critérios de Tensão Média	41
3.4. Regra de Miner	43
3.5. Fadiga de Juntas Soldadas	43
3.5.1. Geometria da Junta	43
3.5.2. Distribuição de Tensões	44
3.5.3. Material	44
3.5.4. Ciclo de Carregamento	44
3.5.5. Defeitos de Soldadura	44
3.5.6. Ambiente	45
Capítulo 4	46
Análise da Norma NF EN 14766	46
4.1. Ensaio 1 - Pedalagem	47

4.2.Ensaio 2 – Carga horizontal	48
4.3.Ensaio 3 – Carga vertical	48
Capítulo 5.....	49
Determinação da Secção do Quadro mais Solicitada	49
5.1.Modelação do Quadro Pelo Método dos Elementos Finitos.....	50
5.2.Resultados Obtidos	57
5.3.Determinação da Secção Mais Solicitada	61
Capítulo 6.....	70
Ensaio de Fadiga.....	70
6.1.Máquina de Ensaio.....	71
6.2.Ensaio de Provetes H.....	73
6.2.1. Provetes H.....	73
6.2.2. Sistema de Amarração	74
6.2.3. Ensaio de Fadiga.....	Erro! Marcador não definido. 75
6.2.4. Resultados Obtidos	77
6.2.5. Análise Metalográfica	81
Capítulo 7	84
Conclusões.....	84
Bibliografia.....	85
Anexo I	A.1
Propriedades da Liga Al 6061-T6.....	A.1
Anexo II	A.4
Verificação do Comportamento do Elemento Finito Beam 3d de Secção	
Variável	A.4
Anexo III	A.9
Procedimento de Colocação do Provete na Máquina	A.9

Anexo IV.....	A.16
Desenhos do Sistema de Amarras.....	A.16
Anexo V.....	A.23
Preparação de Agente de Contrastação	A.23

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Tipos de ligações mecânicas.	4
Figura 2.2 - Processo de soldadura TIG [1].....	6
Figura 2.3 - Tocha de soldadura TIG [1].	7
Figura 2.4 - Bocais e difusores TIG [2].....	7
Figura 2.5 - Processo de soldadura TIG [3].....	8
Figura 2.6 - Fenómeno de abatimento [4].	9
Figura 2.7 - Influência do tipo de gás de protecção no perfil da soldadura [5].	10
Figura 2.8 - Processo de soldadura MIG [1].....	11
Figura 2.9 - Tocha de soldadura MIG/MAG [7].....	11
Figura 2.10 - Processo de soldadura MIG/MAG [3].....	12
Figura 2.11 - Tipos de juntas e de chanfros [8].	14
Figura 2.12 - Tratamento térmico T6 [16].....	17
Figura 2.13 - Geometria do provete a soldar [16].....	18
Figura 2.14 - Defeitos de soldadura.	21
Figura 2.15 - Zonas da soldadura [18].	21
Figura 2.16 - Falta de penetração com: a) uma passagem ; b) duas passagens [19].	22
Figura 2.17 - Falta de fusão [18].	23
Figura 2.18 - Tipos de fendas.....	26
Figura 2.19 – Fenda longitudinal a) [21], fenda na base b) [22] e fenda na zona de fusão c) [23].....	26
Figura 2.20 - Porosidade a) superficial [1] e b) interior [24].....	27

Figura 2.21 - Inclusão de escória [25].	29
Figura 2.22 - Representação esquemática da variação da resistência à fadiga com a redução de área causada por falta de penetração [19].	30
Figura 2.23 - Falta de penetração a) interna e b) superficial [19].	31
Figura 2.24 - Influência da porosidade na resistência à fadiga de juntas soldadas [19].	33
Figura 2.25 - Influência do comprimento da inclusão de escória na resistência à fadiga para 2×10^6 ciclos de juntas soldadas [19].	35
Figura 3.1 - Parâmetros de Fadiga [27].	38
Figura 3.2 - Etapas do fenómeno de fadiga.	38
Figura 3.3 - Superfície de rotura por fadiga [27].	39
Figura 3.4 - Aspecto característico de superfícies de fractura por fadiga [19]. ..	39
Figura 3.5 - Curvas SN ou curvas de Wöhler [28].	41
Figura 4.1 - Ensaio 1 (Pedalagem) [34].	47
Figura 4.2 - Ensaio 2 (Carga Horizontal) [34].	48
Figura 4.3 - Ensaio 3 (Carga Vertical) [34].	48
Figura 5.1 – Modelo sólido do quadro da bicicleta.	50
Figura 5.2 - Elemento de viga beam3d [16].	51
Figura 5.3 - Modelo CosmosM.	52
Figura 5.4 - Modelo CosmosM – Ensaio 1.1.	53
Figura 5.5 - Modelo CosmosM – Ensaio 1.2.	54
Figura 5.6 - Modelo CosmosM – Ensaio 2	55
Figura 5.7 - Modelo CosmosM – Ensaio 3.	56
Figura 5.8 - Análise de tensões CosmosM – Ensaio 1.1.	57
Figura 5.9 - Análise de tensões CosmosM – Ensaio 1.2.	58
Figura 5.10 - Análise de tensões CosmosM – Ensaio 2.	58
Figura 5.11 - Análise de tensões CosmosM – Ensaio 3.	59

Figura 5.12 - Identificação das juntas soldadas do quadro.....	59
Figura 5.13 - Identificação dos elementos e nós utilizados na análise das juntas soldadas do quadro.....	60
Figura 5.14 - Secção crítica.....	68
Figura 5.15 - Detalhe da secção crítica.....	68
Figura 6.1 - Controlador INSTRON Fast Track 8800®.....	72
Figura 6.2 - Máquina de ensaios servo-hidráulica com provete montado.	72
Figura 6.3 - Provete H.	73
Figura 6.4 - Propriedades da secção do provete em H.	73
Figura 6.5 - Desenho do provete H [16].	74
Figura 6.6 - Ensaio de fadiga com provete descentrado.	74
Figura 6.7 - Ensaio de Padalagem: a) Ensaio 1.1; b) Ensaio 1.2 [16].....	77
Figura 6.8 - Ensaio de carga vertical a); e horizontal b) [16].	77
Figura 6.9 - Líquidos penetrantes utilizados.....	79
Figura 6.10 - Provetes após a aplicação dos líquidos penetrantes.	80
Figura 6.11 - Porosidades na soldadura do provete 3.....	80
Figura 6.12 - Microscópio metalográfico.	81
Figura 6.13 - Lupa binocular.....	83
Figura 6.14 - Defeitos de soldadura.	83
Figura A.1 - Viga de secção variável.....	A.4
Figura A.2 - Modelo da viga encastrada/livre sujeita a uma força na extremidade livre.	A.4
Figura A.3 - Diagrama de corpo livre.....	A.6
Figura A.4 - Esforços presentes na viga.	A.6
Figura A.5 - Modelo de elementos finitos, discretização com 10 elementos. ...	A.8
Figura A.6- Sistema de amarras.....	A.9
Figura A.7 - Constituintes do sistema de amarras.....	A.9

Figura A.8 - Colocação das amarras superior e inferior na máquina.	A.10
Figura A.9 - Montagem dos suportes do provete nas amarras.....	A.11
Figura A. 10 - Colocação do provete nos suportes.	A.11
Figura A.11 - Montagem dos comparadores com os suportes magnéticos...	A.12
Figura A.12 - Alinhamento do provete com o eixo de aplicação de força axial da máquina.....	A.12
Figura A.13 - Alinhamento do provete com os suportes.....	A.13
Figura A.14 - Colocação do provete na posição y.....	A.14
Figura A.15 - Colocação do provete na posição z.....	A.15

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Elementos liga Al 6061-T6 [12].....	16
Tabela 2.2 - Propriedades Mecânicas de Ligas de Alumínio [5].....	17
Tabela 2.3 - Parâmetros para soldadura de ligas de alumínio com o processo MIG e utilizando como gás de protecção o Árgon [5].....	19
Tabela 2.4 - Parâmetros de soldadura.....	19
Tabela 2.5 - Defeitos de forma [18,19].....	24
Tabela 2.6 - Dimensões da radiografia[19].....	33
Tabela 5.1 - Propriedades das secções.....	51
Tabela 5.2 - Condições de fronteira - Ensaio 1.1.....	54
Tabela 5.3 - Condições de fronteira - Ensaio 1.2.....	55
Tabela 5.4 - Condições de fronteira - Ensaio 2.....	56
Tabela 5.5 - Condições de fronteira - Ensaio 3.....	57
Tabela 5.6 - Resultados da análise de elementos finitos e valores de tensão de normal e de corte obtidos para cada uma das secções estudadas.....	63
Tabela 5.7 - Resultados da análise de elementos finitos e valores de tensão de normal e de corte obtidos para cada uma das secções estudadas.....	64
Tabela 5.8 - Resultados da análise de elementos finitos e valores de tensão de normal e de corte obtidos para cada uma das secções estudadas.....	65
Tabela 5.9 - Resultados da análise de elementos finitos e valores de tensão de normal e de corte obtidos para cada uma das secções estudadas.....	66
Tabela 5.10 - Valores de dano obtidos.....	67
Tabela 5.11 - Valores de dano obtidos.....	68

Tabela 5.12 - Esforços e tensões no tubo da secção crítica.....	70
Tabela 6.1 - Esforços para realização de ensaios.....	76
Tabela 6.2 - Histórico do carregamento do provete número 2.....	78
Tabela 6.3 - Histórico do carregamento do provete número 3.....	78
Tabela 6.4 - Exemplos de amostras observadas ao microscópio.....	82
Tabela A.1 - Propriedades da liga Al 6061-T6 [12].....	A.1
Tabela A.2 - Propriedades da liga Al 6061-T6 [12].....	A.3
Tabela A.3 - Propriedades da secção inicial da viga.....	A.5
Tabela A.4 - Propriedades da secção final da viga.	A.5
Tabela A.5 - Resultados do modelo de elementos finitos.	A.8
Tabela A.6 - Constituintes do sistema de amarras.....	A.10
Tabela A.7 - Escolha do agente contrastante [20].....	A.23
Tabela A.8 - Preparação do agente contrastante [20].....	A.24

Lista de Siglas e Acrónimos

AC – Corrente eléctrica alternada

Curvas S-N – Curvas tensão / número de ciclos

DC – Corrente eléctrica contínua

MAG – *Metal Active Gas*

MIG – *Metal Inert Gas*

OMS – Empresa OMS – Serviços de Programação, Lda

TIG – *Tungsten Inert Gas*

Lista de Símbolos

$\Delta\sigma$	Gama de tensões
θ_x	Rotação no segundo o eixo x do elemento
θ_y	Rotação no segundo o eixo y do elemento
θ_z	Rotação no segundo o eixo z do elemento
ν	Coeficiente de Poisson do material
σ_a	Tensão alternada
σ_{Alt_Eq}	Tensão alternada equivalente
σ_{ced}	Tensão de cedência do material
σ_F	Tensão devido à força normal F
σ_{f0}	Tensão limite de fadiga para uma tensão média igual a zero
σ_m	Tensão média
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima aplicada
$\sigma_{m\acute{i}n}$	Tensão mínima aplicada
σ_{My}	Tensão normal máxima devido momento flector segundo a direcção yy
σ_{Mz}	Tensão normal máxima devido momento flector segundo a direcção zz
σ_N	Tensão Normal Máxima
σ_{Neq}	Tensão normal aplicada no provete
σ_R	Tensão de rotura do material
τ_{Tr}	Tensão devido momento torsor
τ_{Vt}	Tensão devido esforço transversal em y
τ_{Vs}	Tensão devido esforço transversal em z
a	Parâmetro da Lei de Basquin
A	Área da secção da junta a analisar
A_{tubo}	Área da secção resistente do tubo do provete

b	Parâmetro da Lei de Basquin
E	Módulo de elasticidade do material
F	Força normal
$F_{\text{máx}}$	Força máxima aplicada ao provete
$F_{\text{mín}}$	Força mínima aplicada ao provete
I_{tubo}	Momento de segunda ordem do tubo do provete
M_y	Momento flector em torno do eixo y
M_z	Momento flector em torno do eixo z
N	Número de ciclos
N_f	Número de ciclos desde a iniciação da fenda até à rotura
n_i	Número de ciclos aplicado
N_i	Número de ciclos até à iniciação da fenda
N_p	Força normal a aplicar no provete
N_r	Número de ciclos total até à rotura
Q_y	Momento estático segundo a direcção y
Q_z	Momento estático segundo a direcção z
R	Razão de tensões
r_{tubo}	Raio exterior do tubo do provete
S_e	Tensão limite de fadiga do material
t	Espessura da secção
u	Deslocamento no eixo x no elemento
v	Deslocamento no eixo y no elemento
V_s	Esforço transversal segundo a direcção y
V_t	Esforço transversal segundo a direcção z
w	Deslocamento no eixo z no elemento
y	Distância máxima do eixo neutro à secção da viga
Y	Desvio segundo a direcção y a aplicar no provete
z	Distância máxima do eixo neutro à secção da viga
Z	Desvio segundo a direcção z a aplicar no provete
$@$	Área da secção definida pela linha média

Capítulo 1

Introdução e Objectivo

Neste capítulo pretende-se fazer uma introdução ao presente projecto, sendo nesta identificadas as entidades envolvidas, bem como o âmbito do trabalho em si. Irão também ser identificados os objectivos deste trabalho.

1.1. Introdução

Este trabalho resulta de uma parceria entre a Escola Superior de Tecnologia de Setúbal e a empresa OMS – Serviços de Programação, Lda. Tem como objectivo fundamental validar um processo de soldadura para a posterior construção de um quadro de uma bicicleta.

Irá ser utilizada uma metodologia na pré-validação deste processo de soldadura, com o qual se pretende demonstrar perante o cliente final que serão cumpridos os requisitos da norma EN14766. Esta metodologia visa a realização de ensaios em provetes H, que simulam os esforços presentes no quadro da bicicleta a que o processo de soldadura se destina. Estes esforços foram obtidos utilizando uma simulação através do método dos elementos finitos dos ensaios definidos na norma EN14766 para o tipo de quadro de bicicleta estudado. Deste modo, além de se ter feito uma pré-validação do procedimento de soldadura foi possível ajustar os parâmetros de soldadura sem a realização dos ensaios num quadro inteiro, o que se traduz num menor custo, bem como um menor tempo de produção.

1.2. Objectivos

Este trabalho tem como principais objectivos responder a uma necessidade que surgiu na empresa anteriormente citada. Esta necessidade traduz-se na validação de um processo de soldadura para a construção de quadros de bicicleta segundo a norma EN14766. Para tal será necessário comprovar que um determinado processo de soldadura cumpre com os requisitos da norma mencionada e que a validação deste mesmo processo pode ser realizada apenas recorrendo a ensaios realizados em provetes representativos. Com a metodologia utilizada pretende-se também uma redução dos tempos de produção e consequentemente dos custos associados.

Capítulo 2

Soldadura

Neste capítulo irá ser realizada uma descrição do princípio de alguns processos de soldadura, bem como das suas características, vantagens e desvantagens. Serão também descritos os defeitos que surgem neste tipo de processos e quais as suas consequências na qualidade da soldadura. Numa última fase será ainda feita uma descrição da soldadura da liga Al 6061-T6 que se trata da liga utilizada neste projecto.

2.1. Processos de Soldadura

Os processos de soldadura fazem parte dos processos de união de materiais representados na Figura 2.1.



Figura 2.1 - Tipos de ligações mecânicas.

A soldadura caracteriza-se por ser um processo de ligação de materiais de forma permanente no qual existe continuidade metálica, ou seja, o material a unir é geralmente fundido podendo ou não ser adicionado um outro material durante essa união de materiais. Com este processo as zonas unidas vêm as suas propriedades mecânicas alteradas relativamente ao material base, podendo estas ser melhoradas nalgumas situações.

Existem muitos tipos de processos de soldadura diferentes adaptados às mais variadas necessidades e abrangendo uma grande variedade de materiais a unir. De seguida apresentam-se os principais processos de soldadura, divididos em três grandes grupos:

- Soldadura por Fusão

- Soldadura TIG
- Soldadura MIG/MAG
- Soldadura por Eléctrodo Revestido
- Soldadura por Plasma
- Soldadura com fios fluxados
- Soldadura por arco submerso
- Soldadura Oxiacetilénica
- Soldadura por Laser

- Soldadura por Brasagem

- Brasagem forte
- Brasagem fraca
- Soldobrasagem

- Soldadura no Estado Sólido

- Soldadura por Fricção
- Soldadura por Resistência
- Soldadura por Ultrasons

Neste trabalho foi necessária uma pré-avaliação dos vários processos existentes de modo a aferir se o que a empresa OMS utiliza era o adequado para as necessidades pretendidas. Analisa-se em detalhe, o MIG/MAG (*Metal Active/Inert Gas*) e o TIG (*Tungsten Inert Gas*) por serem os que habitualmente são utilizados em quadros de bicicleta.

Foi então realizada uma comparação entre os dois processos de modo a definir qual o que seria mais adequado para a realização dos quadros de bicicleta soldados considerando automatização. Seguidamente irão ser descritos os princípios de funcionamento, bem como vantagens e desvantagens e aplicações dos dois processos.

2.1.1. Soldadura TIG

O processo de soldadura TIG é um processo de soldadura por fusão com arco eléctrico, podendo este utilizar material de adição ou não, conforme a junta soldada a obter. Utiliza também um gás de protecção que pode ser Árgon, Hélio ou outros, podendo utilizar dois tipos de corrente eléctrica AC (Corrente Alternada) ou DC (Corrente Contínua) consoante a aplicação a que se destina. Na Figura 2.2 encontra-se um esquema de todo o processo TIG, podendo-se observar os vários componentes da máquina de soldadura, nomeadamente a alimentação do gás de protecção, a fonte de alimentação e a refrigeração da tocha (a água).

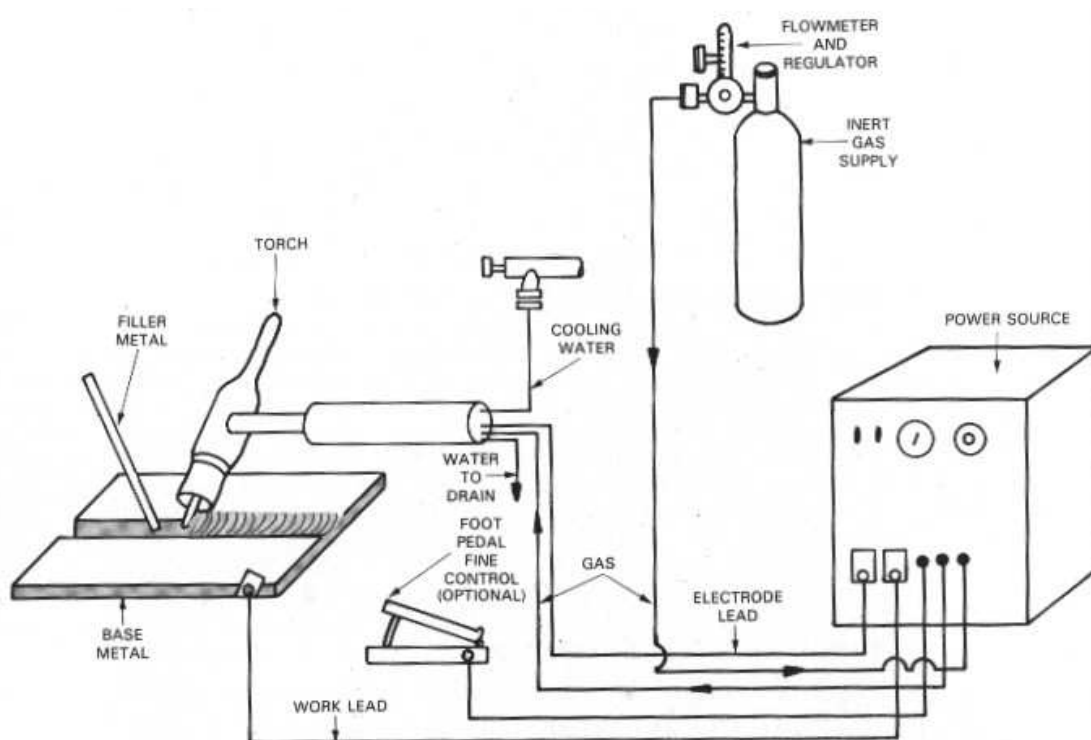


Figura 2.2 - Processo de soldadura TIG [1].

Neste processo de soldadura, a junta soldada pode ser obtida de duas maneiras distintas, apenas pela fusão do material base (sem material de adição) ou utilizando um material de adição que é adicionado com a utilização de uma vareta. A tocha utilizada neste processo (Figura 2.3) é um equipamento complexo, tendo em conta que no seu interior circulam vários fluidos como o gás de protecção e a água para refrigeração, que pode ser opcional. Na tocha encontra-se também um eléctrodo de tungsténio que é o responsável pela criação do arco eléctrico. Este eléctrodo não é considerado uma peça de desgaste, visto que este não se consome com o processo de soldadura, necessitando apenas de ser substituído a longo prazo.

Na Figura 2.3 pode-se observar as entradas de gás e água na tocha, bem como os respectivos canais por onde estes circulam. No caso da água, esta destina-se a arrefecer a zona que se encontra em contacto com o operador bem como o interior da própria tocha. No caso do gás este circula em toda a tocha, sendo encaminhado para a zona de fusão onde entra em contacto com o material fundido. Na ponteira da tocha podem ser utilizados vários tipos de bocais e difusores de maneira a encaminhar o gás de protecção de diferentes maneiras. A utilização destes bocais ou ponteiras é também definida pela geometria da soldadura e do cordão a obter e pelo diâmetro do eléctrodo a utilizar. Os bocais e difusores (Figura 2.4) são geralmente construídos em material cerâmico ou refractário devido às elevadas temperaturas a que se encontram expostos.

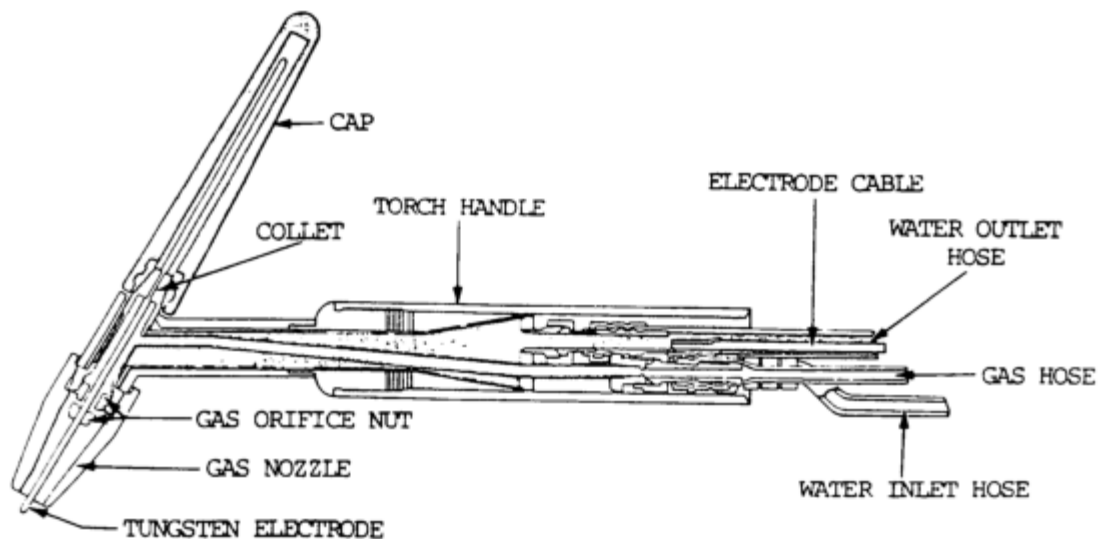


Figura 2.3 - Tocha de soldadura TIG [1].



Figura 2.4 - Bocais e difusores TIG [2].

Na Figura 2.5 encontra-se um esquema do que ocorre na zona de fusão do material. É possível observar o posicionamento do eléctrodo de tungsténio em relação à zona de fusão, bem como o percurso realizado pelo gás de protecção. Pode-se também observar a colocação da vareta de material de adição que poderá ou não ser utilizada, consoante os materiais a unir e o tipo de junta pretendida. Como foi já referido anteriormente, a geometria dos bocais e difusores pode ser determinante no resultado final da soldadura obtida visto que é a forma destes componentes que determinam o escoamento do gás de protecção. Por exemplo, a escolha do diâmetro de um bocal é realizada tendo em conta a largura do cordão de soldadura, pois uma escolha errada terá como consequência uma soldadura com defeitos devido à deficiente protecção com o gás.

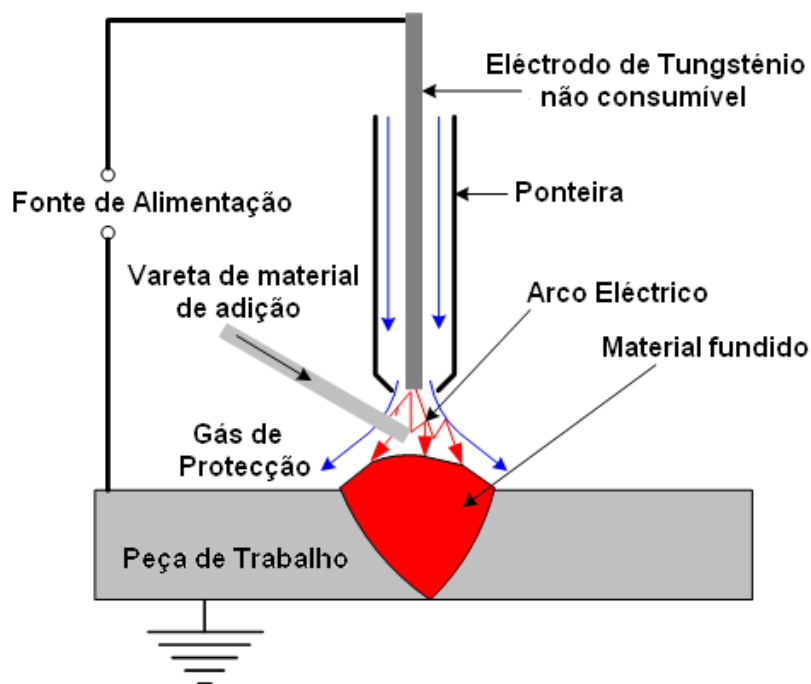


Figura 2.5 - Processo de soldadura TIG [3].

De modo a garantir uma soldadura com qualidade, terão de ser ajustados os vários parâmetros de soldadura, que para este processo são [4,5,6]:

- Tipo de Corrente (AC ou DC);
- Tipo e Caudal do Gás de Protecção (Árgon, Hélio ou outros);
- Tipo e Diâmetro do Eléctrodo de Tungsténio;
- Intensidade de Corrente;
- Tensão do Arco Eléctrico;
- Velocidade de Soldadura;
- Utilização ou não de material de adição;
- Tipo de Material de adição.

O tipo de corrente a utilizar depende do material base no qual se pretende realizar a soldadura. A corrente DC é utilizada para aços não ligados, aços inoxidáveis, cobre e suas ligas, titânio e nióbio, enquanto que a corrente AC é utilizada em alumínio e magnésio e suas respectivas ligas. Neste trabalho a estrutura a soldar trata-se de um quadro de uma bicicleta em alumínio, o que implicará, caso seja esta a técnica utilizada que se utilize corrente AC. No caso do alumínio é utilizada a corrente AC devido à camada superficial que este possuiu (alumina) que tem uma temperatura de fusão bastante mais elevada (2000°C) que a

temperatura de fusão do alumínio que é cerca de 600°C. Esta diferença de temperaturas leva por vezes à possibilidade de abatimento que é o fenómeno representado na Figura 2.6.

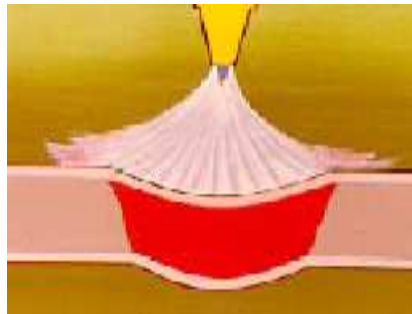


Figura 2.6 - Fenómeno de abatimento [4].

Este fenómeno acontece devido à necessidade de atingir o ponto de fusão da alumina para assim se realizar a soldadura, o que leva a um sobreaquecimento das peças a unir, fazendo com que estas fiquem no seu estado líquido localmente na zona da soldadura.

As principais características deste processo de soldadura são as seguintes:

- Realização de soldaduras em todas as posições;
- Permite a soldadura de diferentes tipos de peças (chapas, tubos, perfis, etc);
- Espessura mínima para a realização de soldaduras 0,5mm e de 10mm de máxima;
- Permite a soldadura em diferentes geometrias do cordão (topo a topo, ângulo, etc);
- Aplicável a todo o tipo de materiais soldáveis;
- Utilizado em equipamentos ferroviários, rodoviários, agrícolas, construção naval e ainda também na indústria química e petroquímica.

Este processo de soldadura, assim como qualquer outro deste tipo utiliza consumíveis que são gastos durante o processo. Neste caso os consumíveis são: o gás de protecção, o material de adição sob a forma de uma vareta e o eléctrodo de tungsténio que apenas necessita de ser substituído devido ao desgaste provocado pelo arco eléctrico neste.

Relativamente aos restantes processos de soldadura, este apresenta as seguintes vantagens [5,6]:

- Aplicável a todos os metais;
- Permite um bom controlo da penetração;
- Pode utilizar corrente AC e DC em função do material;
- Permite a soldadura em todas as posições;

- Não tem escória;
- Permite a Automatização ou Robotização do processo (com limitações);
- Boa acessibilidade.

Em relação às desvantagens quando comparado com outros processos de soldadura, tem-se [5,6]:

- Comprimento fixo do consumível (máximo 100mm);
- Baixo rendimento $\leq 0,5$ kg/h;
- Limitado a espessuras de 10mm;
- Exige boas competências do soldador;
- Grande sensibilidade às correntes de ar;
- Custo elevado dos gases de protecção.

2.1.2. Soldadura MIG/MAG

Este processo é realizado com uma tocha na qual se encontra um fio que é fundido como material de adição. Além da função de material de adição, esse fio serve também como eléctrodo, pois conduz a corrente estabelecendo o arco eléctrico entre a peça ou peças a soldar e a tocha. Por sua vez, o gás de protecção flui através do bocal da tocha protegendo o arco eléctrico e o material em fusão. No caso do processo MIG, o gás utilizado é geralmente o Hélio ou o Árgon ou misturas destes. As diferentes proporções de Hélio e Árgon utilizadas têm influência na secção transversal formada pelo material fundido e a velocidade da soldadura. Cada tipo de gás utilizado produz um perfil de soldadura diferente, estando estes representados na Figura 2.7.

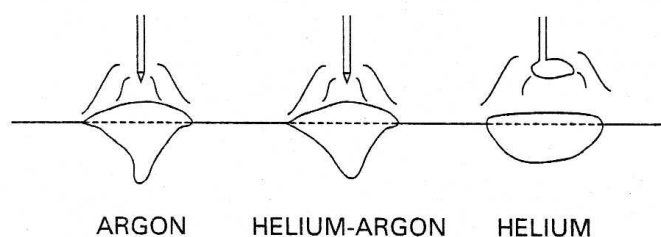


Figura 2.7 - Influência do tipo de gás de protecção no perfil da soldadura [5].

Alterando apenas o tipo de gás de Árgon para Hélio, e mantendo o mesmo tipo de arco, obtém-se um aumento da tensão de cerca de 2 a 3 Volt, proporcionada apenas pelo tipo de gás utilizado. O Árgon é o tipo de gás mais utilizado e garante uma boa estabilidade do arco

e uma boa penetração, enquanto que o Hélio é mais utilizado em processos automatizados com correntes mais elevadas.

O equipamento utilizado neste tipo de soldadura é composto por uma máquina de soldadura semi-automática à qual está associada uma alimentação gasosa (gás de protecção) e uma bobine de arame que alimenta a tocha como material de adição. Na Figura 2.8, encontra-se representado todo o processo MIG na qual estão representados os vários componentes anteriormente descritos.

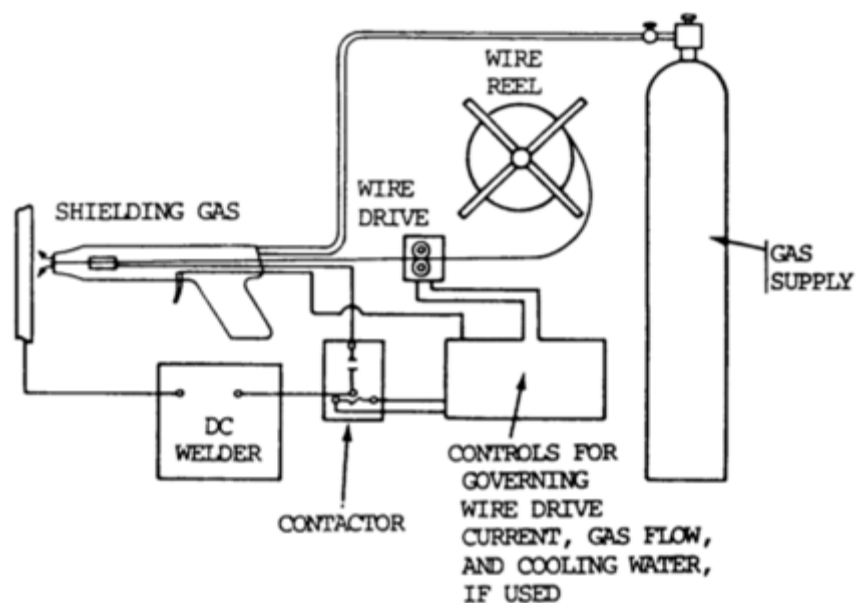


Figura 2.8 - Processo de soldadura MIG [1].

Um dos componentes essenciais para a realização deste processo de soldadura é a tocha. A tocha utilizada (Figura 2.9) apresenta um canal interior pelo qual passa o arame que funciona como material de adição, bem como uma zona por onde flui o gás de protecção de modo a que este entre em contacto com a zona da soldadura.

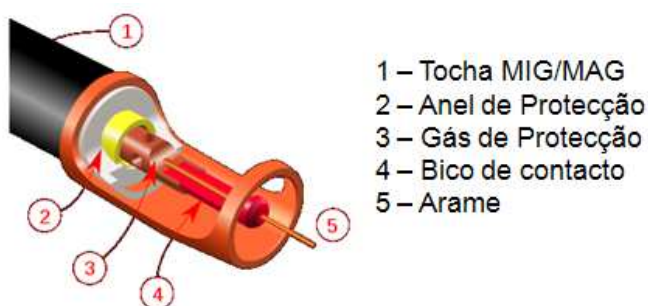


Figura 2.9 - Tocha de soldadura MIG/MAG [7].

Na Figura 2.9 encontra-se uma ilustração da tocha, na qual é possível observar os vários orifícios por onde flui o gás de protecção e passa o material de adição. Este tipo de tocha é utilizado tanto no processo de soldadura MIG como MAG. A diferença entre eles tem a ver com o tipo de gás utilizado e com a forma como o gás reage com o material fundido. A tocha pode ser operada manualmente ou poderá eventualmente ser operada por um sistema automatizado de modo a otimizar o processo de soldadura. No entanto todo o processo se desenrola da mesma maneira, ocorrendo os fenómenos representados na Figura 2.10.

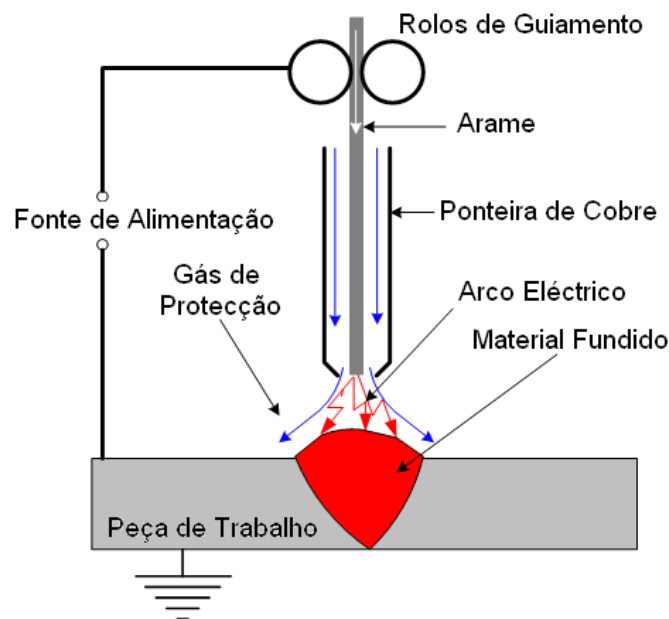


Figura 2.10 - Processo de soldadura MIG/MAG [3].

De modo a obter uma boa soldadura, terão de ser tidos em conta vários parâmetros. Estes parâmetros variam de soldadura para soldadura, ou seja, consoante o tipo de material, dimensão do cordão, forma do cordão, espessura das peças a soldar, etc. Podem-se então nomear os parâmetros deste tipo de soldadura [4,5,6]:

- Intensidade de corrente;
- Velocidade de alimentação do arame (material de adição);
- Tensão eléctrica;
- Velocidade de soldadura;
- Tipo de arame;
- Dimensão do arame;

- Tipo de gás de protecção;
- Caudal de gás de protecção;
- Distância livre do arame;
- Distância de trabalho;

Alguns destes parâmetros são regulações que as próprias máquinas de soldadura permitem, outros são regulados directamente pelo operador caso se trate de uma soldadura manual ou pré-programados ou de uma soldadura automatizada.

Quando comparado com outros processos de soldadura, este processo apresenta a seguintes vantagens [5,6]:

- Aplicável a todos os metais;
- Solda em todas as posições;
- Pode utilizar corrente AC e DC em função do material;
- Taxa de depósito entre 1,2 a 1,5 kg/h;
- Possui um eléctrodo contínuo;
- Permite automatização;
- Formação de escória, apenas quando utiliza CO₂.

Em relação às desvantagens tem-se:

- Necessita de bastante acessibilidade;
- Limitado a espessuras de 50mm;
- Risco de ocorrência de fusão/colagens;
- Boas competências do soldador;
- Elevada sensibilidade às correntes de ar;
- Custo elevado dos gases de protecção.

Independentemente do processo de soldadura, podem ser realizadas soldaduras das mais variadas formas, existindo no entanto algumas excepções. Na Figura 2.11 encontram-se algumas das formas de soldaduras mais utilizadas.

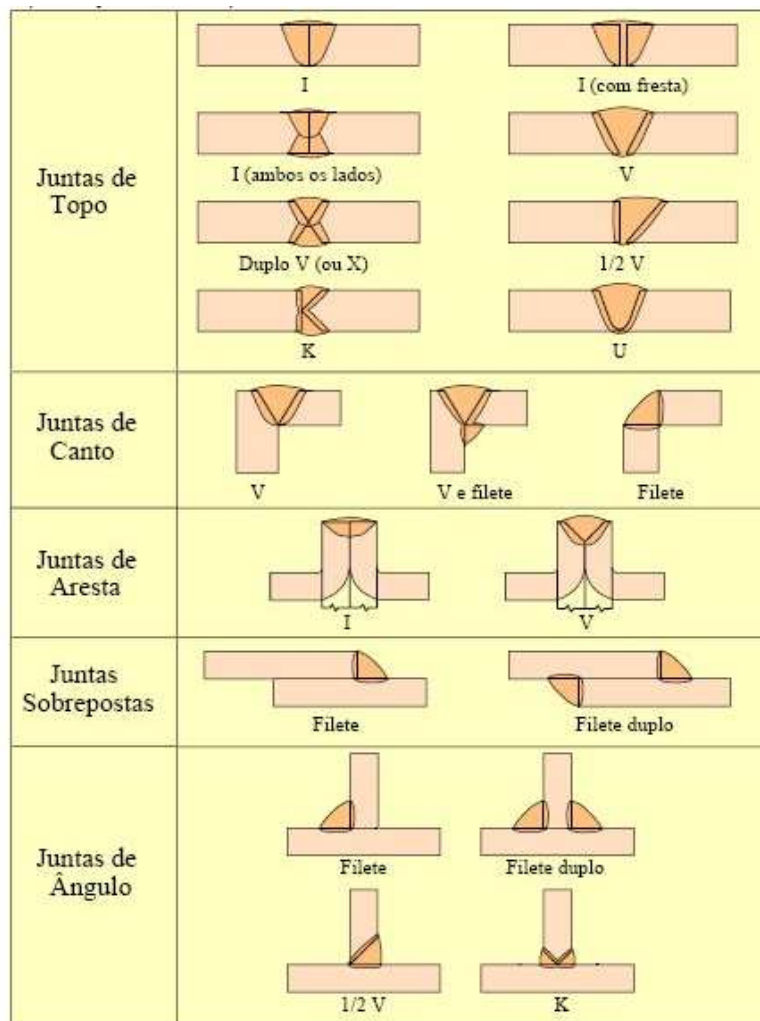


Figura 2.11 - Tipos de juntas e de chanfros [8].

Para cada uma das formas de soldaduras, as juntas a unir poderão ter vários tipos de chanfros. Os vários tipos de chanfros destinam-se a diferentes tipos de solicitações a que as peças ou componentes irão posteriormente estar sujeitos.

Todas estas técnicas e processos de soldadura podem ser sujeitos a um processo de automatização e/ou robotização. A automatização de um processo de soldadura pode ter vários objectivos, sendo geralmente o aumento de qualidade e de produtividade, os seus principais.

No entanto quando se põe em causa a implementação de um processo automatizado, há vários factores que devem ser tidos em conta, como por exemplo:

- A dificuldade de obter mão-de-obra qualificada num determinado local ou situação;
- A repetibilidade da operação;
- Os pré-requisitos do cliente ou destinatário do produto;

- O nível de qualidade pretendido.

Uma mesma operação de soldadura pode ainda ter vários níveis de automatização, podendo por exemplo a tocha de soldadura deslocar-se para determinado sítio automaticamente mas a própria soldadura ser realizada por um operador. Este nível de automatização deve ser definido pelos seguintes factores:

- Quantidade a produzir;
- Investimento a realizar;
- Qualidade do produto;
- Mão-de-obra.

2.2. Soldadura Al 6061-T6

A liga de alumínio a ser utilizada no quadro de bicicleta aqui estudado foi a Al 6061-T6. Em termos de propriedades desta liga podem-se destacar a boa resistência à corrosão, a excelente soldabilidade e a boa relação densidade/resistência mecânica. Devido a estas propriedades é utilizada em muitas aplicações nobres como a indústria aeronáutica e aeroespacial e em componentes que se encontram sujeitos a cargas dinâmicas [5,9].

Esta liga trata-se de um alumínio da série 6000, nomeadamente a 6061 que possui na sua composição o Magnésio (0,8–1,2%) e o Silício (0,4-0,8%) além de outros elementos em menores quantidades, como se pode observar na Tabela 2.1, bem como no Anexo I [10,11].

Tabela 2.1 – Elementos liga Al 6061-T6 [12].

Elemento Químico	Percentagem presente na liga [%]
Cobre, Cu	0.15 - 0.40
Ferro, Fe	<= 0.70
Magnésio, Mg	0.80 - 1.20
Manganês, Mn	<= 0.15
Outros, cada	<= 0.050
Outros, total	<= 0.15
Silício, Si	0.40 - 0.80
Titânio, Ti	<= 0.15
Zinco, Zn	<= 0.25

O tratamento térmico aplicado à liga trata-se de um T6. Este tratamento pode ser dividido em três etapas: solubilização, têmpera e envelhecimento. Na solubilização, o material é aquecido até uma temperatura tal, que se forma uma solução sólida uniforme dissolvendo quaisquer precipitados na matriz de alumínio. A segunda etapa é a têmpera, que consiste num arrefecimento brusco de material com o objectivo de obter uma microestrutura saturada. Por último é aplicado o envelhecimento na qual é formada uma rede de precipitados muito finos e homogeneamente distribuídos no material. O ciclo térmico deste tratamento encontra-se representado na Figura 2.12. Por vezes existe a necessidade de após o tratamento térmico manter o material armazenado em zonas de baixa temperatura de modo a garantir que não haja envelhecimento da liga devido à temperatura ambiente [13,14,15].

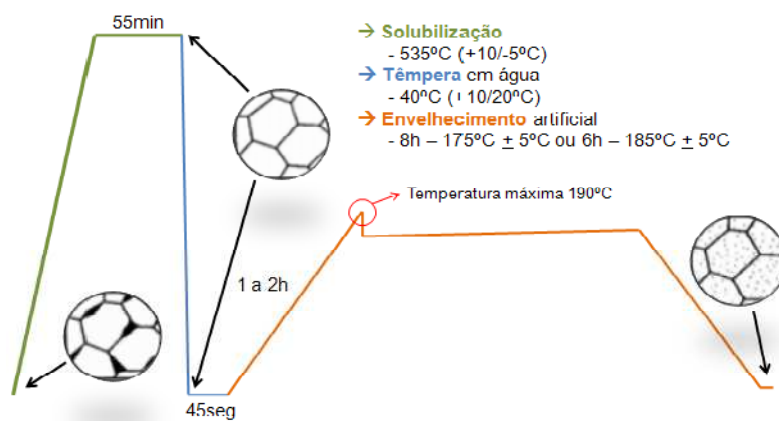


Figura 2.12 - Tratamento térmico T6 [16].

Na Tabela 2.2 encontram-se algumas propriedades da liga utilizada com vários tipos de tratamento térmico, inclusive o utilizado, bem como de outras ligas de alumínio.

Tabela 2.2 - Propriedades Mecânicas de Ligas de Alumínio [5].

Aluminum Alloy	Temper	Ultimate Tensile Strength		Yield Strength (0.2% Offset)		Elongation % in 2 in. (50.8 mm)		Shear Strength		Fatigue Strength ^b		Brinnell Hardness ^c (500 kg load)
						1/16 in. (1.6 mm)	1/2 in. (12.7 mm)					
		ksi	MPa	ksi	MPa	Sheet	Round	ksi	MPa	ksi	MPa	
2014	-0	27	186	14	96	—	18	18	124	13	89.6	45
	-T4	62	428	42	290	—	20	38	262	20	138	105
	-T6	70	483	60	414	—	13	42	290	18	124	135
2017	-0	26	180	10	69	—	22	18	124	13	89.6	45
	-T4	62	428	40	276	—	22	38	262	18	124	105
2024	-0	27	186	11	76	20	22	18	124	13	89.6	45
	-T3	70	483	50	345	18	—	41	283	20	138	120
	-T4	68	469	47	324	20	19	41	283	20	138	120
	-T361	72	496	57	393	13	—	42	290	18	124	120
2036	-T4	49	338	28	193	24	—	—	—	18	124	—
2090	-T8	78	538	72	496	7.5	6	—	—	—	—	—
2218	-T72	48	331	37	255	—	11	30	207	—	—	95
2219	-0	25	172	11	76	18	—	—	—	—	—	—
	-T31	52	358	36	248	17	—	—	—	—	—	—
	-T62	60	414	42	290	10	—	—	—	15	103	—
	-T81	66	455	51	352	10	—	—	—	15	103	—
	-T87	69	476	57	393	10	—	—	—	15	103	—
2519	-T87	72	496	64	441	10	—	44	303	28	189	132
2618	-T61	64	441	54	372	—	10	38	262	18	124	115
6005	-T1	28	193	18	124	—	18	—	—	—	—	—
	-T5	44	303	39	269	—	12	26	179	—	—	—
6009	-T4	33	228	18	124	25	—	22	152	17	117	—
6010	-T4	42	290	25	172	24	—	28	193	18	124	—
6013	-T4	43	296	23	159	22	—	—	—	—	—	—
6061	-T6	59	407	54	372	9	—	34	234	—	—	—
	-0	18	124	8	55	25	30	12	83	9	62.1	30
	-T4	35	241	21	145	22	25	24	166	14	96.5	65
	-T6	45	310	40	276	12	17	30	207	14	96.5	95
6063	-0	13	90	7	48	—	—	10	69	8	55.2	25
	-T1	22	152	13	90	20	—	14	96	9	62.1	42
	-T5	27	186	21	145	12	—	17	117	10	68.9	60
	-T6	35	—	31	—	12	—	22	—	10	68.9	73
6070	-T6	55	379	51	352	10	—	34	234	14	96.5	—
6101	-H111	14	96	11	76	—	—	—	—	—	—	—
	-T6	32	221	28	193	15	—	20	138	—	—	71
6262	-T9	58	400	55	379	—	10	35	241	13	89.6	120
6351	-T5	45	310	41	283	—	12	27	186	—	—	—
	-T6	48	331	45	310	—	11	27	186	—	—	—

a. Continued on next page.

b. Fatigue strength for round specimens and 500 million cycles.

c. 10-mm ball used.

Em termos de soldadura desta liga, como foi já referido anteriormente, apresenta uma boa soldabilidade, o que é vantajoso tendo em conta as formas complexas do quadro da bicicleta a soldar.

Tendo em conta a liga utilizada e a geometria da junta soldada, é possível à partida definir uma gama de valores para alguns parâmetros. A geometria da junta utilizada é uma junta de canto entre dois perfis cilíndricos e que não sofreu qualquer tipo de preparação, não apresentando assim qualquer chanfro. Os perfis a unir são tubos com um diâmetro exterior de 35mm e interior de 31mm. Estes formam entre si um ângulo de 90°, sendo maquinados de modo a que permitam um perfeito encosto entre ambos. Na Figura 2.13 é possível observar a geometria da soldadura utilizada.

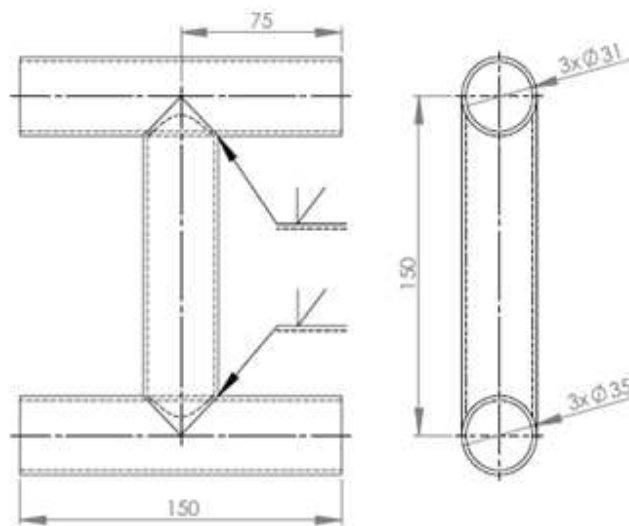


Figura 2.13 - Geometria do provete a soldar [16].

A espessura dos tubos a unir é de 2mm. A Tabela 2.3, indica-nos algumas gamas de valores para alguns parâmetros de soldadura. Parâmetros estes que influenciam, como foi já referido anteriormente, a qualidade da soldadura obtida, bem como as propriedades mecânicas da soldadura e da zona termicamente afectada.

Tabela 2.3 - Parâmetros para soldadura de ligas de alumínio com o processo MIG e utilizando como gás de protecção o Árgon [5].

Section Thickness in. mm	Welding Position ^a	Joint Geometry ^b	Root Opening		No. of Weld Passes	Electrode Diameter		Welding Current (DCEP), A	Arc Voltage, V	Shielding Gas Flow Rate ^c		Travel Speed	
			in.	mm		in.	mm			ft ³ /h	L/min	in./min	mm/s
0.06 1.6	F	A	0	0	1	0.030	0.8	70-110	15-20	25	12	25-45	10.5-19.0
	F	G	0.09	2.4									
0.09 2.4	F	A	0	0	1	.030-.047	0.8-1.2	90-150	18-22	30	14	25-45	10.5-19.0
	F,V,H,O	G	0.12	3.2	1	0.030	0.8	110-130	18-23	30	14	23-30	9.7-12.7
0.12 3.2	F,V,H	A	0.09	2.4	1	.030-.047	0.8-1.2	120-150	20-24	30	14	24-30	10.2-12.7
	F,V,H,O	G	0.19	4.6	1	.030-.047	0.8-1.2	110-135	19-23	30	14	18-28	7.6-11.8
0.19 4.8	F,V,H	B	0.06	1.6	2	.030-.047	0.8-1.2	130-175	22-26	35	16	24-30	10.3-12.7
	F,V,H	F	0.06	1.6	1	.047	1.2	140-180	23-27	35	16	24-30	10.3-12.7
	O	F	0.06	1.6	2	.047	1.2	140-175	23-27	60	28	24-30	10.3-12.7
	F,V	H	0.09-0.19	2.4-4.8	2	.047-.062	1.2-1.6	140-185	23-27	35	16	24-30	10.3-12.7
	H,O	H	0.19	4.8	3	.047	1.2	130-175	23-27	60	28	25-35	10.5-14.8
0.25 6.4	F	B	0.09	2.4	2	.047-.062	1.2-1.6	175-200	24-28	40	19	24-30	10.3-12.7
	F	F	0.09	2.4	2	.047-.062	1.2-1.6	185-225	24-29	40	19	24-30	10.3-12.7
	V,H	F	0.09	2.4	3F,1R	.047	1.2	165-190	25-29	45	21	25-35	10.5-14.8
	O	F	0.09	2.4	3F,1R	.047-.062	1.2-1.6	180-200	25-29	60	28	25-35	10.5-14.8
	F,V	H	0.12-0.25	3.3-6.4	2-3	.047-.062	1.2-1.6	175-225	25-29	40	19	24-30	10.3-12.7
	O,H	H	0.25	6.4	4-6	.047-.062	1.2-1.6	170-200	25-29	60	28	25-40	10.5-16.9
0.38 9.6	F	C-90°	0.09	2.4	1F,1R	.062	1.6	225-290	26-29	50	24	20-30	8.5-12.7
	F	F	0.09	2.4	2F,1R	.062	1.6	210-275	26-29	50	24	24-35	10.3-14.8
	V,H	F	0.09	2.4	3F,1R	.062	1.6	190-220	26-29	55	26	24-30	10.3-12.7
	O	F	0.09	2.4	5F,1R	.062	1.6	200-250	26-29	80	38	25-40	10.5-16.9
	F,V	H	0.25-0.38	6.4-9.6	4	.062	1.6	210-290	26-29	50	24	24-30	10.3-12.7
	O,H	H	0.38	9.6	8-10	.062	1.6	190-260	26-29	80	38	25-40	10.5-16.9
0.75 19.0	F	C-60°	0.09	2.3	3F,1R	.062-.094	1.6-2.4	340-400	26-31	60	28	14-20	5.9-8.5
	F	F	0.12	3.2	4F,1R	.094	2.4	325-375	26-31	60	28	16-20	6.8-8.5
	V,H,O	F	0.06	1.6	8F,1R	.062	1.6	240-300	26-31	80	38	24-30	10.3-12.7
	F	E	0.06	1.6	3F,3R	.062	1.6	270-330	26-31	60	28	16-24	6.8-10.3
	V,H,O	E	0.06	1.6	6F,6R	.062	1.6	230-280	26-31	80	38	16-24	6.8-10.3

a. F – flat; V – vertical; H – horizontal; O – overhead

b. Refer to Figure 1.3

c. Nozzle ID = 5/8 to 3/4 in. (16 to 19 mm)

Devido à confidencialidade desta informação, a OMS não disponibilizou os parâmetros de soldadura utilizados na produção dos provetes ensaiados. No entanto, consultando a tabela anterior pode-se retirar uma gama de valores para cada um dos parâmetros, sendo estes apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Parâmetros de soldadura.

Posição de Soldadura	Abertura da Raiz [mm]	Número de Passagens	Diâmetro do Electrodo [mm]	Corrente de Soldadura [A]	Tensão do Arco [V]	Caudal do Gás [L/min]	Velocidade de Soldadura [mm/s]
F,V,H	2,4	1	0,8 - 1,2	120 - 150	20 - 24	14	10,2 - 12,7
F,V,H,O	4,6	1	0,8 - 1,2	110 - 135	19 - 23	14	7,6 - 11,8

Relativamente à posição de soldadura, a designação apresentada na tabela anterior tem o seguinte significado:

F – Soldadura no Plano;

V – Soldadura Vertical;

H – Soldadura Horizontal;

O – Soldadura Invertida.

A posição de soldadura utilizada na construção dos provetes, não pode ser identificada por nenhum destes tipos, pois os provetes possuem uma soldadura circular que é realizada por um braço robotizado que se desloca para a sua realização.

2.3. Defeitos de Soldadura

Todos os processos de fabrico introduzem defeitos no material, e o processo de soldadura não foge à regra. De entre os defeitos ou descontinuidades de soldadura irão ser identificados e explicados vários, como por exemplo: porosidades, falta de penetração, falta de fusão, defeitos de forma, fendas, podendo estes ser gerados por um ou mais factores.

Os defeitos têm como característica a amplificação das tensões presentes nas soldaduras devido à redução da área resistente que a estes se encontra associada, ou seja, quanto maior o defeito, maior a redução da área resistente da soldadura e consequentemente menor a resistência da soldadura às solicitações. Por sua vez estas descontinuidades apresentam diversas características que devem ser tidas em conta, sendo estas: a sua dimensão, a sua intensidade, orientação em relação à soldadura e sua respectiva localização na soldadura.

Os defeitos em soldadura podem estar relacionados com o próprio processo de soldadura e a sua realização, sendo por isso bastante importante uma escolha do processo de soldadura adequado a cada situação. Podem também ser originadas pelo próprio projecto da junta que poderá não ser o mais adequado para o tipo de processo de soldadura utilizado, ou ainda por questões relacionadas com a metalurgia do material (base ou de adição) utilizado na realização da soldadura [5].

Os defeitos podem assim dividir-se em dois grandes grupos, os planares e os não planares, conforme a Figura 2.14. Os defeitos planares são os que não apresentam um volume mensurável, como por exemplo uma fenda ou uma falta de fusão. Por sua vez, os defeitos não planares são aqueles que possuem forma volúmica e que possuem dimensões no plano que contém o defeito, apresentando uma dimensão insignificante no plano perpendicular a este [4].

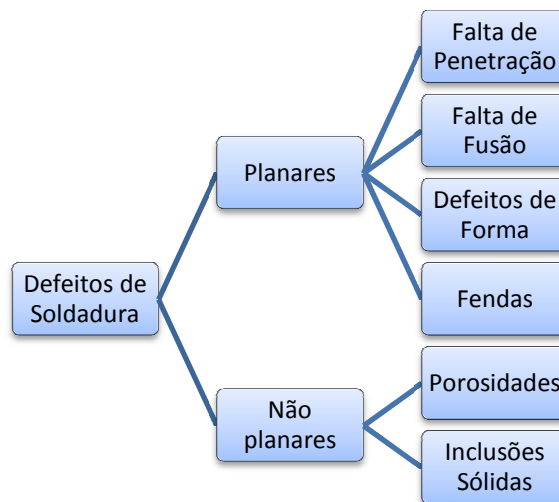


Figura 2.14 - Defeitos de soldadura.

Dependendo do tipo de defeito assim este poderá ocorrer na zona de fusão, na zona termicamente afectada ou no metal base. Na Figura 2.15 encontra-se a representação de uma soldadura em corte de modo a permitir uma melhor distinção destas três zonas.

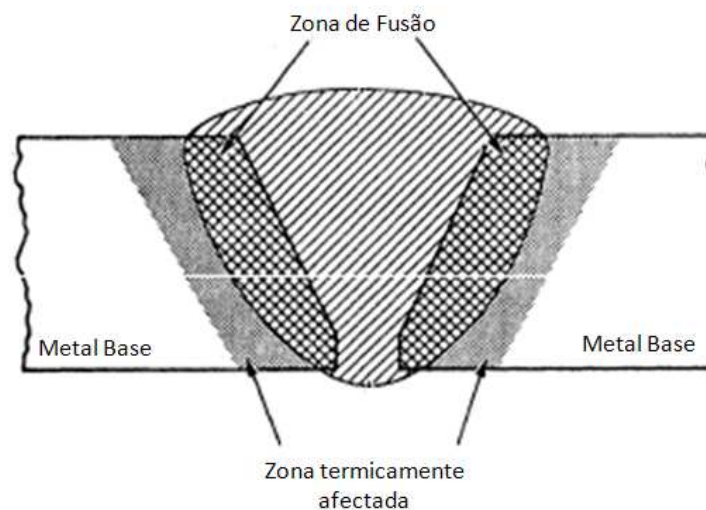


Figura 2.15 - Zonas da soldadura [18].

Irão agora ser descritos os defeitos anteriormente mencionados quanto à sua natureza e quais os factores que os podem gerar.

2.3.1. Falta de Penetração

A falta de penetração é um defeito planar que consiste numa falha na fusão do material, acontecendo geralmente na raiz da junta, dando origem a um espaço vazio entre os dois bordos da junta. Ocorre quando a espessura do metal base depositado é inferior à espessura das placas a unir, dando assim origem a um vazio. Pode também ocorrer falta de penetração devido a outros factores: como a baixa temperatura de soldadura, geometria da junta desadequada, ângulo de posição da tocha incorrecto, fraco controlo do arco eléctrico ou elevada velocidade de soldadura [4,6].

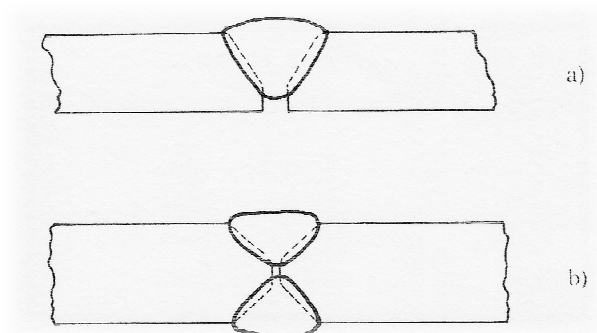


Figura 2.16 - Falta de penetração com: a) uma passagem ; b) duas passagens [19].

A falta de penetração pode ocorrer de dois modos (Figura 2.16): superficial ou internamente. A primeira situação é a mais frequente enquanto que a segunda apenas acontece quando se tratam de soldaduras com mais do que uma passagem, podendo a falta de penetração ser numa zona interior localizada entre as duas passagens de soldadura. Este defeito origina um enfraquecimento da soldadura quando sujeita a esforços estáticos e dinâmicos [19].

2.3.2. Falta de Fusão

Este tipo de defeito acontece a nível atómico e consiste na falta de ligação entre o material de adição e o material base, ou caso não exista material de adição, entre as duas peças a unir. Podem existir vários tipos deste defeito: falta de fusão no flanco, falta de fusão entre passes e falta de fusão na raiz. As faltas de fusão no flanco acontecem quando existe uma descontinuidade de material na zona lateral da soldadura. Esta descontinuidade pode ser superficial ou interior, dificultando nesse caso a sua detecção, bem como a determinação da sua influência na resistência mecânica da soldadura. Quando existem soldaduras com vários passagens, existe a possibilidade de ocorrência de faltas de fusão entre os dois passes de

soldadura, provocando assim uma zona fragilizada. Na Figura 2.17 encontra-se representada uma soldadura com dois casos de falta de fusão.

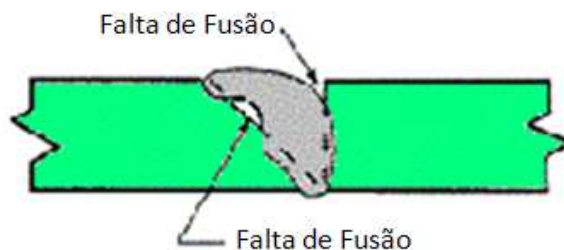


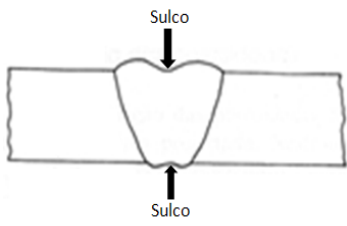

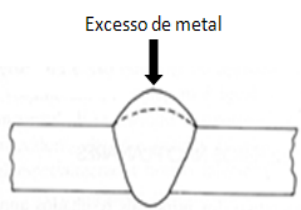
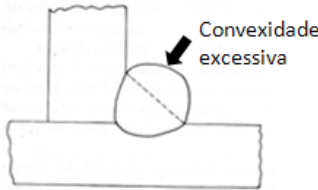
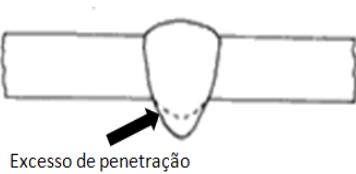
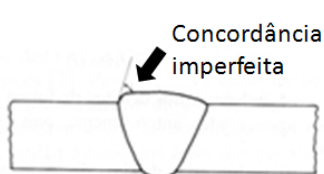
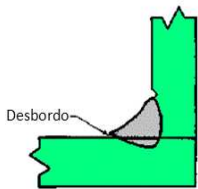
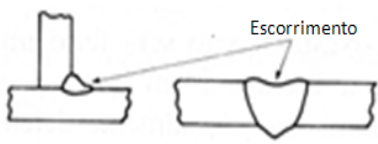
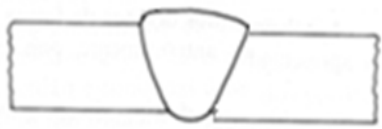

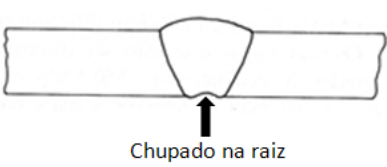
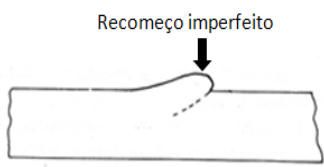
Figura 2.17 - Falta de fusão [18].

A falta de fusão na raiz ocorre na base da soldadura, tornando esta zona mais frágil. Como método de prevenir este defeito, recomenda-se a não utilização de juntas em "V" muito fechadas. Como podem identificar-se a má preparação e limpeza da junta, a escolha do processo de soldadura a utilizar, geometria da junta desadequada, corrente de soldadura insuficiente, baixa acessibilidade, incorrecto gás de protecção e escolha errada de eléctrodo (dimensão e material) [19,20].

2.3.3. Defeitos de Forma

Os defeitos de forma consistem numa falha de conformidade geométrica do cordão para com o perfil da própria peça a soldar. Neste tipo de defeitos encontram-se os sulcos, as mordeduras, excessos de metal de adição, convexidade excessiva, excesso de penetração, concordância imperfeita, desbordo, escorrimento, desalinhamento axial, desalinhamento angular, chupado na raiz e recomeço imperfeito. Os defeitos de forma dependem sobretudo da geometria da junta adoptada, das especificações dimensionais utilizadas e da garantia de que estas são cumpridas durante o processo de soldadura. A maioria destes defeitos é independente do tipo de processo, podendo ocorrer em vários tipos de processos pois tratam-se, como foi já referido, de defeitos dimensionais. Na Tabela 2.5 encontram-se exemplificados os defeitos de forma anteriormente descritos.

Tabela 2.5 - Defeitos de forma [18,19].

Sulco	Mordedura	Excesso de metal de adição
		
Convexidade excessiva	Excesso de Penetração	Concordância imperfeita
		
Desdobro	Escorrimento	Desalinhamento Axial
		
Desalinhamento Angular	Chupado na raiz	Recomeço imperfeito
		

2.3.4. Fendas

Trata-se de um dos defeitos mais críticos do ponto de vista da resistência mecânica de uma junta soldada. Ocorre no material base e/ou no material de adição quando a tensão de ruptura do material é atingida, sendo esta situação originada por várias causas.

Uma das principais causas deste defeito são as concentrações de tensões geradas por descontinuidades no material originadas pela própria geometria do cordão de soldadura ou por outros defeitos.

As fendas podem ser classificadas como quentes ou frias consoante a altura do processo em que surgem. As fendas quentes são as que ocorrem durante o processo de

solidificação do metal, podendo surgir nos limites granulares ou até dividindo os próprios grãos do metal. Este tipo de fendas apenas pode surgir na zona de fusão ou de fronteira com o material base, visto o aparecimento de fendas estar associado ao processo de solidificação do metal. As fendas frias, como o próprio nome indica, surgem durante o período pós-solidificação, podendo surgir durante o período de serviço da soldadura ou anteriormente a este.

A propagação das fendas quentes tem a particularidade de ocorrer apenas nos limites de grão, enquanto que as fendas frias propagam-se tanto pelos limites de grão como pelos próprios grãos.

As fendas podem surgir longitudinal ou transversalmente em relação à soldadura, podendo ser de vários tipos consoante a sua orientação, localização e geometria. São assim classificadas como fendas: longitudinais, transversais, irradiantes e na raiz (podem surgir outros tipos em casos mais específicos). [4,19]

Fendas longitudinais – este tipo de fendas está geralmente associado a velocidades de soldadura elevadas e à presença de porosidades internas, podendo também ser originadas devido à deformação que ocorre durante o processo de solidificação do metal.

Fendas transversais – Estas fendas são sempre perpendiculares ao eixo da soldadura. Podem ser limitadas em comprimento pela dimensão da zona de fusão, podendo em alguns casos propagar-se pela zona termicamente afectada ou mesmo para o metal base. As fendas transversais são normalmente geradas pelas tensões de contracção do material que actuam na zona onde o metal apresenta uma menor ductilidade e consequentemente uma menor resistência à deformação.

Fendas irradiantes – estas fendas são originadas por uma interrupção repentina do arco de soldadura. Podem também ser referidas como fendas em estrela devido ao seu formato, pois surgem por vezes como um aglomerado em forma de estrela.

Fendas de raiz – estas fendas surgem, como o próprio nome sugere, na raiz da soldadura, apresentando uma disposição longitudinal.

Na Figura 2.18 encontram-se representados os tipos de fendas descritos anteriormente bem como a sua localização provável (zona de fusão, raiz, base e zona afectada pelo calor).

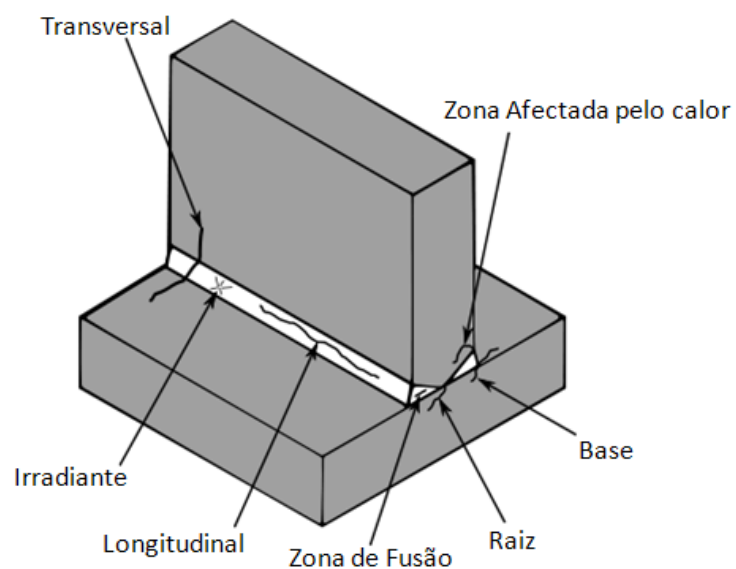


Figura 2.18 - Tipos de fendas.

Na Figura 2.19 , encontram-se algumas imagens de casos reais que ilustram os tipos de fendas anteriormente descritos.

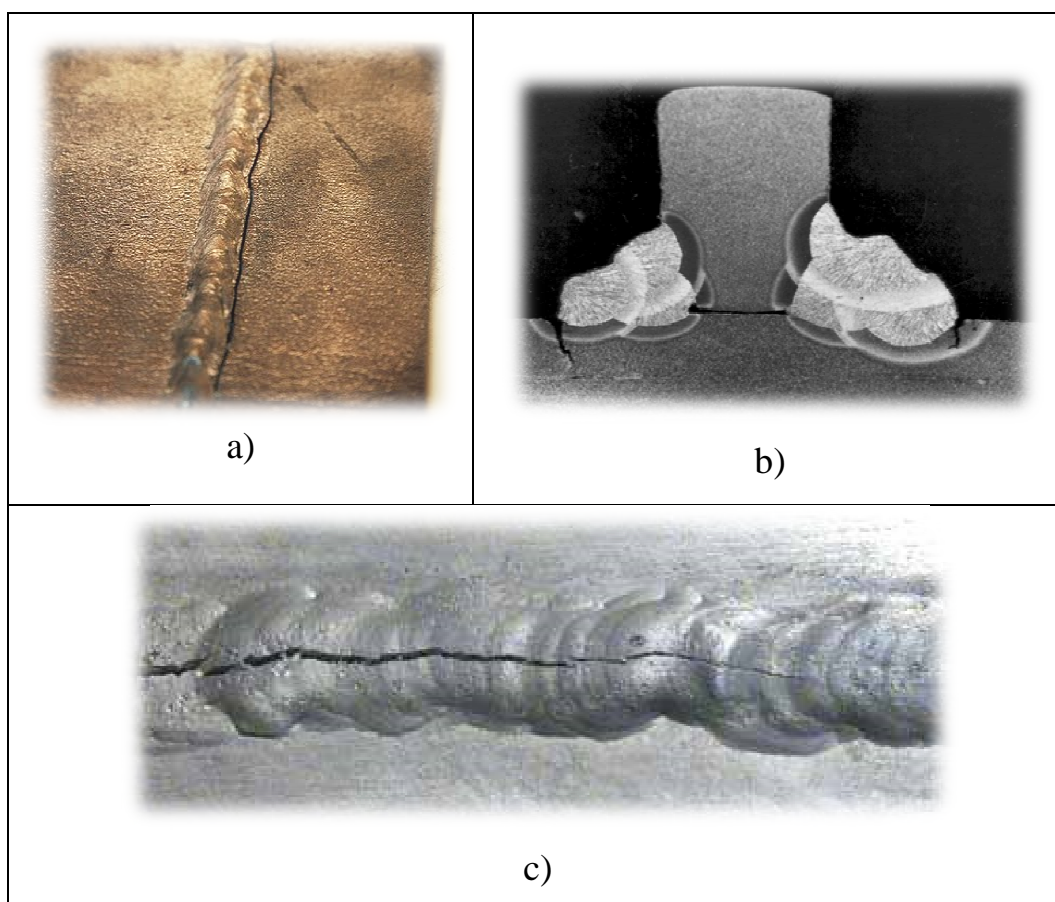


Figura 2.19 – Fenda longitudinal a) [21], fenda na base b) [22] e fenda na zona de fusão c) [23].

2.3.5. Porosidades

As porosidades são o tipo de defeitos mais frequente em todos os processos de soldadura. Trata-se de vazios na zona do cordão de soldadura, podendo encontrar-se à superfície ou na zona interior do cordão (Figura 2.20).

As porosidades num cordão de soldadura são geralmente classificadas tendo em conta dois parâmetros, o seu volume e a sua área projectada. Os poros apresentam geralmente um diâmetro mínimo de 0,5mm, podendo atingir os 6 ou 7mm de diâmetro máximo.

Este tipo de defeito pode aparecer em soldaduras realizadas com apenas uma passagem ou com múltiplas passagens, podendo ocorrer nas zonas entre as várias passagens de soldadura.

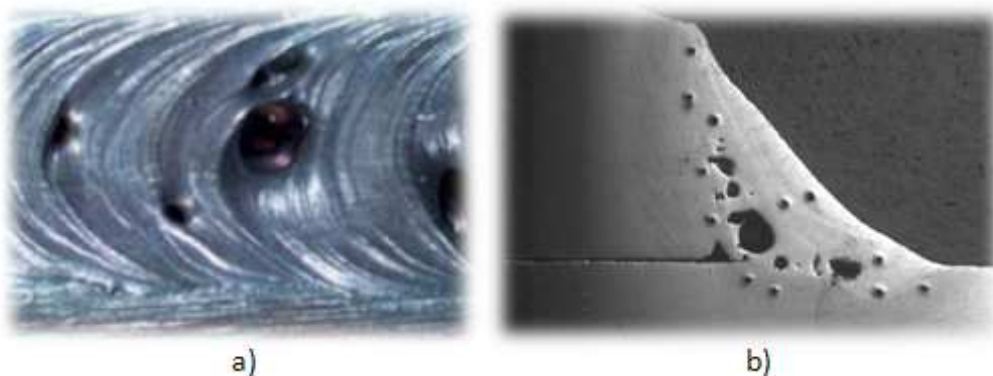


Figura 2.20 - Porosidade a) superficial [1] e b) interior [24].

Os poros podem também ser classificados quanto à forma e quanto à disposição. Quanto à forma podem ser esféricos, alongados ou vermiculares, relativamente à disposição podem ser alinhados, uniformemente distribuídos ou em ninhos.

A porosidade por ser gerada por vários factores: presença de gases no material fundido (hidrogénio e outros), má limpeza da junta, arco eléctrico inadequado, libertação de gases formados durante a solidificação do metal, contracção do metal durante a solidificação, interrupção abrupta do arco eléctrico, elevado teor de enxofre no material base caso este se trate de aço, humidade presente no eléctrodo, correntes de ar que perturbem a protecção realizada pelo gás, ou, caso se trate de soldadura em alumínio, da espessura da sua camada superficial de óxido. Esta camada muito fina tem como função proteger o material, no entanto, quando exposta a ambientes agressivos ou altas temperaturas tende a aumentar a sua espessura a grande velocidade. Como o ponto de fusão da camada de óxido é cerca de três vezes superior ao do material base, o processo de soldadura tem de garantir uma limpeza da

camada de óxido para se obter uma soldadura eficaz, dificultando assim a sua fusão e solidificação que propiciam o surgimento de porosidades em zonas onde a camada de óxido é superior [14,19].

Casos particulares de porosidades em ninhos, ou seja, agrupadas, são geralmente originados pela incorrecta iniciação e finalização do arco de soldadura [20]. Como foi já referido anteriormente, existem casos onde a porosidade é apenas interior não apresentando quaisquer evidências de defeitos à superfície, o que dificulta a detecção deste tipo de defeitos. Para uma eficaz detecção deste tipo de defeito deverá ser utilizada radiografia.

Segundo alguma literatura [19], a presença de 3% de porosidades na soldadura não tem influência em propriedades mecânicas como a tensão de rotura e cedência do cordão, quando esta se encontra solicitada a situações estáticas. Deste modo, o projectista deve ter presente o tipo de soldadura a realizar bem como o tipo de carregamento a que esta irá ser sujeita, estabelecendo os limites de porosidade aceitáveis para a soldadura em questão.

Em alguns estudos realizados [19], constatou-se que a influência da porosidade em situações que a soldadura se encontra sujeita a fadiga é pouco significativa tendo em conta as concentrações de tensões geralmente originadas pela própria geometria da superfície da soldadura. No entanto, em casos em que são realizados tratamentos superficiais na soldadura, as porosidades poderão ter um papel mais determinante na resistência à fadiga da soldadura, pois contribuem para o aparecimento de concentrações de tensões no interior desta. As porosidades superficiais são bastante prejudiciais, pois além de afectar a própria geometria da soldadura, propiciam as concentrações de tensões e enfraquecem a soldadura relativamente ao seu comportamento à fadiga, podendo levar a que ocorra rotura.

2.3.6. Inclusões sólidas

Este tipo de defeito consiste no do aprisionamento de corpos estranhos na massa de metal fundido, que após a sua solidificação se mantêm no seu interior.

Podem existir vários tipos de inclusões: inclusões de escória, inclusões de óxidos e inclusões metálicas, sendo as inclusões de escória as que ocorrem com mais frequência. Na Figura 2.21 pode-se observar uma inclusão de escória numa soldadura com duas passagens.

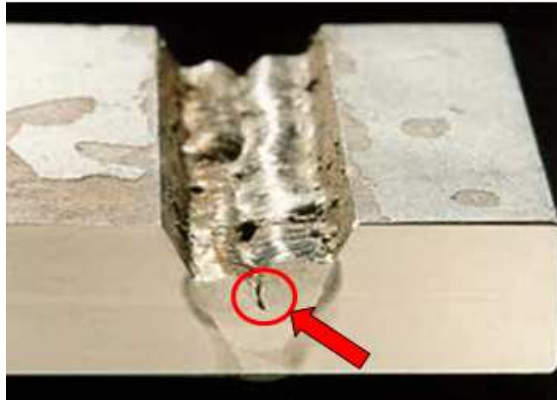


Figura 2.21 - Inclusão de escória [25].

As inclusões de escória surgem geralmente quando se utilizam processos de soldadura por eléctrodo revestido e ocorrem devido à deficiente limpeza entre as várias passagens de soldadura, gerando assim uma zona da soldadura enfraquecida.

Como causas do surgimento de inclusões sólidas, podemos ter: a utilização de um processo de soldadura defeituoso, uma má acessibilidade à zona da junta e a falta de limpeza das superfícies da junta, podendo esta estar contaminada com impurezas que irão dar origem a inclusões.

A existência de irregularidades na geometria da própria junta pode proporcionar o surgimento de inclusões. No caso particular das inclusões metálicas, estas ocorrem quando a junta se encontra contaminada com partículas metálicas, (Ex: tungsténio, cobre etc.).

2.4. Consequência dos defeitos da soldadura no comportamento à fadiga

A existência dos defeitos anteriormente identificados e descritos originam uma redução da resistência à fadiga das soldaduras, devido à concentração de tensões por estes gerada. No entanto a própria geometria da soldadura pode ser determinante quanto à influência de um determinado defeito na diminuição da resistência à fadiga. Pode-se assim afirmar que um defeito terá mais impacto na resistência à fadiga de uma soldadura que seja previamente tratada superficialmente do que numa que não sofra qualquer tipo de tratamento. Este fenómeno deve-se ao facto de a soldadura tratada ter menor tendência para apresentar concentrações de tensões superficiais, sendo as provocadas pelos defeitos mais relevantes. Por outro lado, as soldaduras com uma geometria que apresente uma menor resistência à fadiga são mais sensíveis a defeitos. A identificação e quantificação dos defeitos são bastante importantes não apenas em termos de resistência à fadiga da soldadura mas também porque

permitem definir procedimentos de controlo de qualidade, de acordo com os defeitos identificados, tornando desse modo a produção de juntas soldadas mais eficaz e económica.

2.4.1. Falta de Penetração

Este tipo de defeito propicia a iniciação de fendas, quando apresenta valores superiores a 7% [19] da espessura da chapa soldada. A resistência à fadiga da junta soldada apenas é afectada no caso de cargas com um grande número de ciclos (10^7 ciclos) e para faltas de penetração intermitentes ou contínuas iguais ou superiores a 20% da espessura. Nesta situação as reduções de resistência à fadiga são da ordem dos 50 a 75% relativamente ao caso de juntas soldadas topo a topo sem qualquer tipo de defeitos. Quando se trata de um pequeno número de ciclos (inferior a 10^5) a diferença entre juntas com defeitos intermitentes ou contínuos e sem defeitos não é significativa. Este tipo de defeito não é facilmente detectável, sendo sugerido por alguns autores [10] a não remoção do reforço da soldadura, garantindo assim uma margem de segurança superior relativamente a uma rotura por fadiga. Na Figura 2.22, pode-se observar um gráfico que relaciona a redução da área causada pela falta de penetração com a resistência à fadiga de uma soldadura.

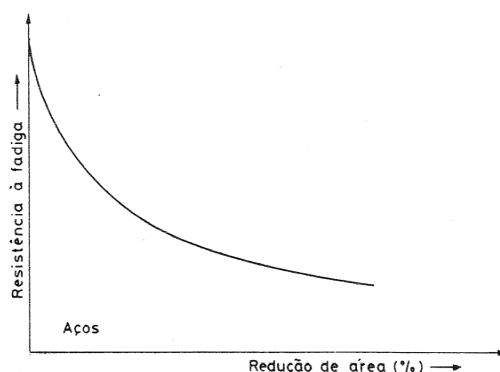


Figura 2.22 - Representação esquemática da variação da resistência à fadiga com a redução de área causada por falta de penetração [19].

Um aspecto a ter em conta quando existe este tipo de defeito é a localização da falta de penetração, ou seja, se é superficial ou interna. Considerando duas situações em que a redução de área é igual mas em que o defeito se encontra à superfície ou internamente, a situação mais desfavorável em termos de resistência à fadiga é quando o defeito é à superfície. Tal acontece devido ao maior factor de concentração de tensões gerado pela localização superficial da fenda. O exemplo destas duas situações encontra-se apresentado na Figura 2.23.

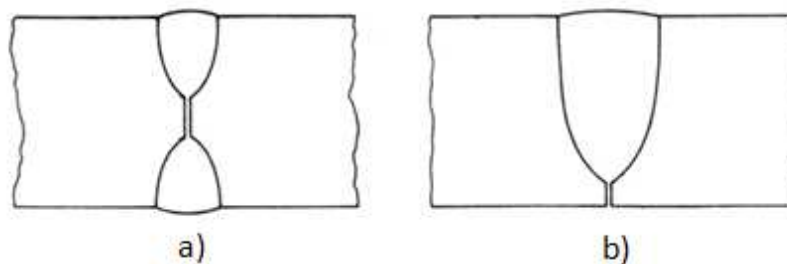


Figura 2.23 - Falta de penetração a) interna e b) superficial [19].

2.4.2. Falta de Fusão

A falta de fusão é geralmente um defeito intermitente que pode apresentar uma dimensão variável. Caso se trate de um defeito de grandes dimensões, este terá um efeito semelhante à falta de penetração. As consequências deste defeito no comportamento à fadiga da soldadura são semelhantes às da falta de penetração.

2.4.3. Defeitos de Forma

Este tipo de defeitos apresenta consequências graves na resistência à fadiga de juntas soldadas. A maior ou menor influência deste tipo de defeitos prende-se geralmente com a forma do cordão e com a maior ou menor severidade das concentrações de tensões que esta possa causar quando a soldadura se encontra em serviço. A sua influência pode ser avaliada através do ângulo de concordância entre a superfície do cordão e o material base. A título de exemplo refira-se que o ensaio de fadiga a uma junta soldada com um ângulo de concordância de 100° [10], demonstrou que caso este fosse alterado para 180° a sua resistência à fadiga aumentaria cerca de 50%. Este tipo de quantificação é conseguido através de ensaios para casos específicos, pois existem muitas variáveis o que impossibilita uma quantificação universal para todas as situações.

Nalgumas situações são utilizadas operações de afagamento destinadas a melhorar o ângulo de concordância anteriormente mencionado, reduzindo assim o surgimento de concentrações de tensões. Nestes casos o que acontece é que o afagamento acaba por evidenciar defeitos interiores como a porosidade, falta de fusão, ou mesmo fendas, tornando a soldadura mais sensível a estes defeitos. É assim preferível a execução de soldaduras com ângulos de concordância mais suaves, pois desse modo consegue-se uma maior resistência à fadiga. [10]

2.4.4. Fendas

Muitos dos defeitos anteriormente descritos dão origem ao aparecimento de fendas. Antes de se dar a rotura propriamente dita, inicia-se uma fenda que posteriormente se propaga e conduz à rotura. Podem no entanto surgir, como foi anteriormente mencionado, fendas durante o próprio processo de soldadura ou posteriormente a este sem estarem associadas a outro tipo de defeitos.

Quando se pretende determinar a influência de uma fenda em termos de resistência à fadiga de uma soldadura, recorre-se à Mecânica de Fractura. Esta permite obter uma previsão da vida à fadiga em função das dimensões e geometria da fenda, das propriedades do material, etc. Um aspecto determinante neste tipo de defeitos é a geometria da soldadura, já que é responsável pela concentração de tensões e consequentemente pela velocidade de propagação das fendas, que se traduz numa maior ou menor resistência à fadiga.

2.4.5. Porosidade

Para definir a influência da porosidade na soldadura, é utilizado um parâmetro denominado severidade do defeito que se determina através da subtracção do somatório das áreas das porosidades numa dada secção à área total da secção, obtendo-se assim a área útil da secção. De modo a obter a severidade de um defeito são normalmente utilizados dois métodos: no primeiro são realizadas duas radiografias, uma à junta soldada e outra a uma peça padrão, sendo posteriormente determinada a densidade dos dois filmes, obtendo-se através da diferença das densidades a percentagem de porosidades. Pode-se afirmar que este processo tem uma boa precisão. Relativamente ao segundo método, contam-se o número de poros de vários tamanhos numa determinada área da radiografia, sendo posteriormente calculada, a partir deste valor, a redução de volume devido a estes poros tendo em conta que a sua forma é aproximadamente esférica. Demonstra-se que a redução de volume em percentagem é igual à percentagem média de redução de área da secção transversal analisada. Pode-se garantir uma boa precisão deste método para níveis baixos ou médios de porosidades, mas acima dos 3% de porosidades, este método não se revela eficaz.

A análise feita utilizando a radiografia deve ser realizada com alguma precaução. A área analisada, deve ser proporcional à espessura que engloba a maior quantidade de porosidade no cordão, respeitando as dimensões presentes na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Dimensões da radiografia[19].

Espessura da placa [mm]	Largura x comprimento da área da radiografia [mm]
<10	5 x 30
10 a 30	10 x 50
>30	15 x 70

Quando uma junta soldada apresenta porosidades, esta vê a sua resistência à fadiga ser reduzida. Esta redução pode ser prevista através da realização de ensaios de fadiga a juntas soldadas que apresentem as mesmas características quer a nível dimensional quer a nível de defeitos. O estudo da influência da porosidade no comportamento à fadiga foi inicializado por Homes em 1938 [19]. O seu estudo baseou-se em ligas de aço, tendo obtido gráficos que relacionam a resistência à fadiga com a severidade do defeito.

Na Figura 2.24 pode-se observar que a resistência à fadiga decresce muito até níveis de 5% de porosidade e que para um valor de cerca de 12% de porosidade verifica-se uma redução de 50% da resistência à fadiga. No caso de determinadas juntas, porosidades de apenas 1% podem gerar reduções da resistência à fadiga de cerca de 30%, o que revela que a soldadura é muito sensível a variações deste defeito.

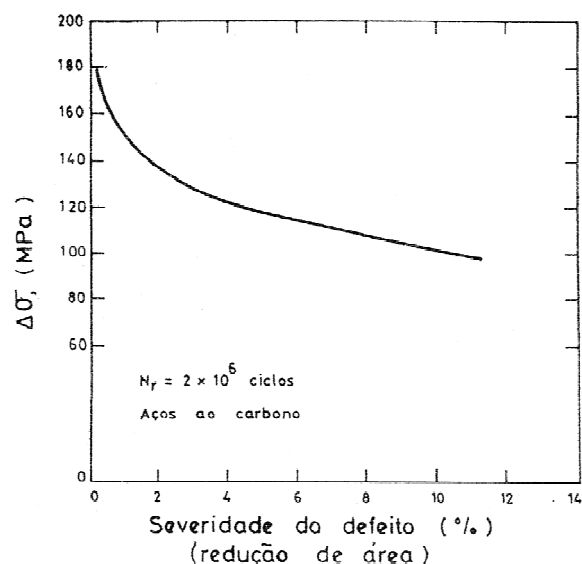


Figura 2.24 - Influência da porosidade na resistência à fadiga de juntas soldadas [19].

Como foi já referido anteriormente os poros podem surgir interior ou superficialmente, podendo nalguns casos estes últimos serem mais prejudiciais. Através de ensaios realizados

por alguns autores [19,6] utilizando provetes com poros superficiais, conseguiu-se determinar que para o mesmo valor de severidade do defeito (percentagem da área da secção transversal), a resistência à fadiga é menor no caso da existência de poros superficiais do que no caso de poros interiores. No entanto para valores de porosidade superiores a cerca de 8%, a sua localização não influencia a resistência à fadiga da junta soldada.

O tamanho individual dos poros também pode ter influência na resistência à fadiga, ou seja, para o mesmo valor de severidade, esta pode produzir valores diferentes de resistência à fadiga para dimensões diferentes dos poros. Torna-se assim difícil determinar a dimensão máxima admissível para um poro isolado visto que esta dimensão depende de muitas variáveis. Pode-se no entanto garantir a segurança da junta soldada, considerando que podem existir poros com uma dimensão máxima igual à de uma fenda, que poderia existir nas mesmas condições de serviço, dimensão essa que pode ser determinada utilizando a Mecânica de Fractura.

No caso da fadiga oligocíclica os resultados obtidos mostram que para soldaduras sujeitas a tensão constante, os níveis de porosidade até 20% não afectam a resistência à fadiga e que acima desse valor não faz sentido uma análise visto que 20% de porosidade se pode considerar uma soldadura inaceitável.

2.4.6. Inclusões Sólidas

Este tipo de defeito é aquele que ocorre com maior frequência em juntas soldadas, sendo também o mais fácil de reproduzir experimentalmente para a realização de ensaios de fadiga. Na Figura 2.25 encontra-se um gráfico que representa a resistência à fadiga em função do comprimento da inclusão de escória.

Pode-se constatar que a resistência à fadiga diminui com o aumento do comprimento da inclusão de escória. No entanto, a redução da resistência à fadiga não é súbita, como acontece por exemplo com as porosidades, mas sim gradual.

No caso de se tratar de uma soldadura de junta de alumínio, este defeito pode surgir devido à presença de inclusões de óxidos de alumínio. Se a soldadura com este defeito não for sujeita a afagamento, será necessária uma inclusão de óxido de alumínio superior a 7% para que a falta de fusão dê origem a uma fenda. Caso a junta sofra um processo de afagamento, a influência das inclusões de óxidos de alumínio dependerá não só da sua dimensão mas também da sua forma e localização no interior do cordão da soldadura.

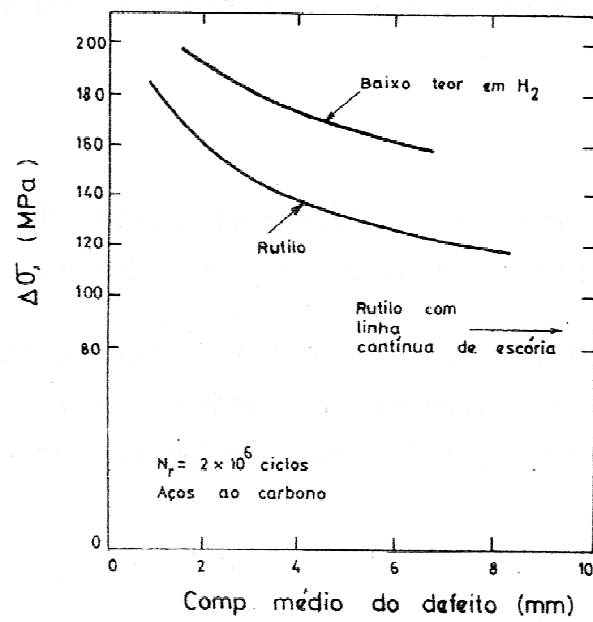


Figura 2.25 - Influência do comprimento da inclusão de escória na resistência à fadiga para 2×10^6 ciclos de juntas soldadas [19].

Capítulo 3

Fadiga de Materiais

Neste capítulo serão abordados vários temas relacionados com a falha por fadiga. Será descrito o fenómeno de fadiga e qual a sua influência quando um elemento estrutural se encontra sujeito a cargas dinâmicas. São apresentados vários critérios que permitem o dimensionamento de componentes à fadiga. Por fim aborda-se a influência de vários parâmetros no comportamento à fadiga de juntas soldadas.

3.1. Fenómeno de Fadiga

Segundo a definição ASTM [26], a fadiga material define-se como um “fenómeno de enfraquecimento progressivo de um material quando este está submetido a cargas dinâmicas ou repetidas”, ou seja, é a degradação das propriedades mecânicas que levam à falha de um componente mecânico sujeito a um carregamento cíclico.

O estudo deste fenómeno teve início em meados do século XIX (1840) quando este começou a ter uma importância económica devido aos danos que provocava. O primeiro registo de estudos realizados sobre fadiga é da obra do engenheiro alemão Wöhler. Esses estudos foram realizados em veios de locomotivas de comboios, os quais sofriam fracturas frequentemente sem razão aparente. O fenómeno da fadiga foi um grande desafio para os cientistas e engenheiros da época que se deparavam com cada vez mais situações de fractura em equipamentos sujeitos a cargas dinâmicas. O fenómeno de fadiga continua a ser hoje em dia a causa principal da ruína de equipamentos mecânicos, o que justifica o facto de ser a área mais significativa de estudo do comportamento mecânico de materiais. A elevada ocorrência de fracturas por fadiga deve-se não ao facto de não terem havido progressos nesta área, mas sim da necessidade de produzir peças e estruturas mais eficientes e económicas, o que se traduz na utilização de tensões admissíveis mais elevadas.

No estudo do fenómeno da fadiga definem-se assim vários parâmetros de fadiga os quais caracterizam a situação de carregamento de um determinado componente:

$$\Delta\sigma - \text{Gama de tensões } (\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \quad (3.1)$$

σ_{\max} - Tensão máxima aplicada

σ_{\min} - Tensão mínima aplicada

$$\sigma_m - \text{Tensão Média } \left(\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}\right) \quad (3.2)$$

$$\sigma_a - \text{Tensão Alternada } \left(\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}\right) \quad (3.3)$$

Na Figura 3.1 estão representados os principais parâmetros, anteriormente descritos, existindo ainda outros que estão associados a situações de carga mais complexas (não representado), nas quais os ciclos de carga não são constantes e assumem formas não lineares.

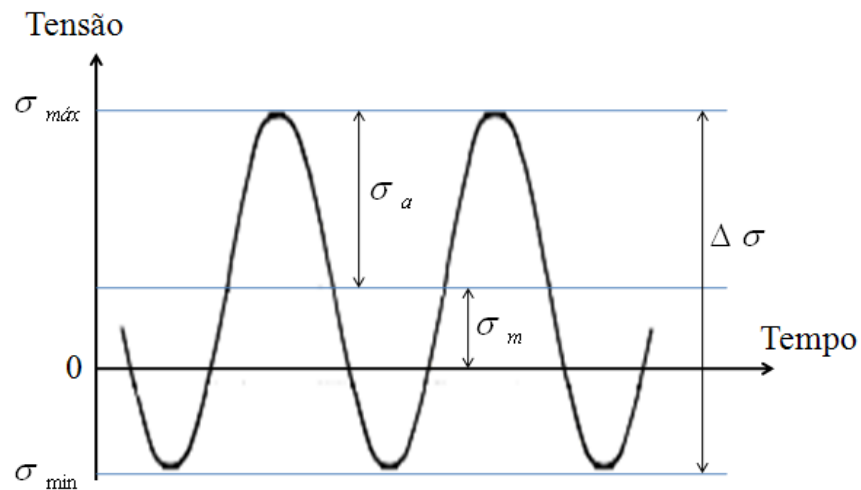


Figura 3.1 - Parâmetros de Fadiga [27].

Os casos para os quais os ciclos de carga aplicados não são sinusoidais como o apresentado anteriormente, são geralmente repartidos em blocos, transformando-se assim em casos mais simples de analisar. Estes blocos são depois unidos e analisados como um todo, obtendo-se assim uma boa aproximação da realidade e uma maior simplicidade dos cálculos a efectuar.

A rotura por fadiga é provocada pela iniciação e propagação mais ou menos lenta de uma ou mais fendas que surgem numa peça ou componente durante o seu funcionamento. Nos casos de fractura por fadiga, esta pode ocorrer sob solicitações bastante inferiores ao limite de resistência do material, devido ao aparecimento de fendas como foi anteriormente descrito. O fenómeno de fadiga pode-se dividir em três etapas, desde o aparecimento da fenda até à rotura final. Essas etapas encontram-se representadas na Figura 3.2.

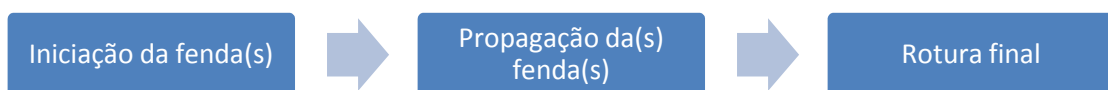


Figura 3.2 - Etapas do fenómeno de fadiga.

Geralmente nas superfícies de fractura por fadiga consegue-se observar as zonas relativas a cada uma destas etapas, podendo assim ser feita uma análise pós rotura, de modo a determinar alguns parâmetros. Na Figura 3.3 encontra-se um esquema de uma superfície de rotura por fadiga, na qual se podem observar as três etapas.



Figura 3.3 - Superfície de ruptura por fadiga [27].

O fenómeno de fadiga pode ser provocado por vários tipos de esforços, (tracção, flexão, torção, etc) no entanto o aspecto da superfície de fractura apresenta as mesmas três zonas distintas, podendo estas terem uma forma diferente.

Na Figura 3.4, encontram-se vários casos de fracturas por fadiga e o aspecto da superfície de rotura, em função do tipo de carregamento aplicado.

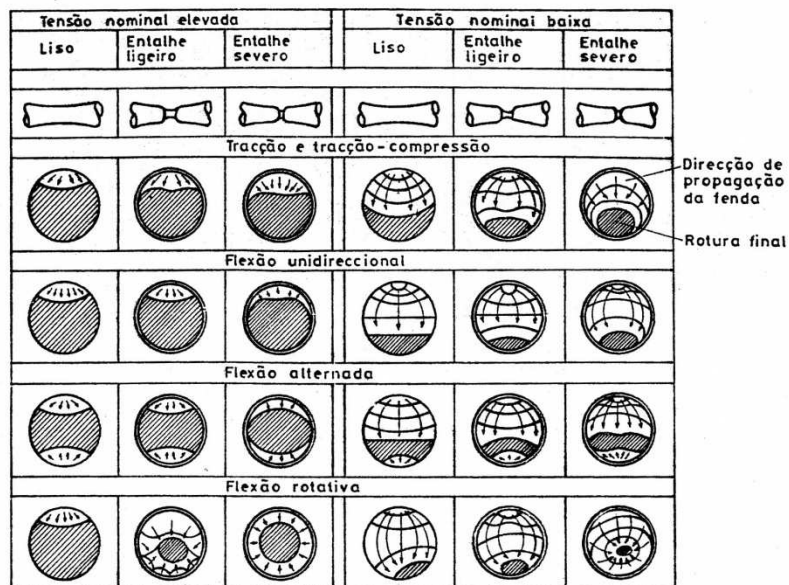


Figura 3.4 - Aspecto característico de superfícies de fractura por fadiga [19].

Na primeira fase do processo de fadiga, dá-se a iniciação da fenda. O aparecimento pode ser superficial ou interno, acontecendo geralmente onde existem imperfeições microscópicas como descontinuidades de material, inclusões, rugosidades, defeitos superficiais como riscos, defeitos provenientes do processo de fabrico, entre outros. No entanto, o

aparecimento de fendas poderá não ser só devido a defeitos mas também à geometria do componente que dá origem a concentração de tensões e consequentemente ao aparecimento de fendas nessas zonas. O aparecimento das fendas acontece geralmente no regime elástico.

Numa segunda fase, dá-se a propagação desta, a qual vai atravessando o componente, diminuindo assim a área resistente. À medida que a fenda se vai propagando, a resistência mecânica do componente vai diminuindo, também devido à aplicação dos ciclos de carga a que o componente está sujeito. Quando a fenda atinge uma dimensão tal que o material restante na secção transversal não é suficiente para suportar as tensões aplicadas, surge então a fractura. Esta fractura caracteriza-se geralmente por ser do tipo frágil e repentina, resultando numa superfície rugosa. Após a fractura deve-se realizar uma análise da superfície obtida com o objectivo de determinar o número de ciclos que o componente suportou após a iniciação da fenda. Com base nesta análise é também possível determinar o valor de tensão máxima suportada pelo material antes de sofrer fractura, através da determinação da área da zona de rotura final.

A duração de um componente à fadiga define-se pelo número de ciclos de aplicação da carga até à rotura. A vida do componente pode ser obtido por (3.4).

$$N_r = N_i + N_f \quad (3.4)$$

em que N_r representa o número de ciclos total até à rotura, N_i o número de ciclos até à iniciação da fenda e N_f o número de ciclos desde a iniciação da fenda até à rotura. Na maioria dos casos, a parcela N_i representa cerca de 90% da vida do componente, diminuindo essa percentagem no caso de existirem imperfeições significativas que propiciem a iniciação de fendas.

O dimensionamento de componentes à fadiga é geralmente feito através de curvas S-N com base na tensão limite de fadiga do material. Esta tensão limite de fadiga representa a tensão máxima até à qual os materiais poderão sofrer um número infinito de ciclos de carga sem que ocorra rotura. Na Figura 3.5 encontram-se duas curvas S-N ou Curvas de Wöhler, que relacionam a tensão aplicada com o número de ciclos.

A curva A é uma curva típica de um material com a tensão limite de fadiga (S_e) bem definida, como por exemplo um aço. A curva B representa um aspecto típico de um metal não-ferroso, como por exemplo o alumínio, no qual a tensão limite de fadiga apresenta um valor muito inferior quando comparado com a tensão de cedência.

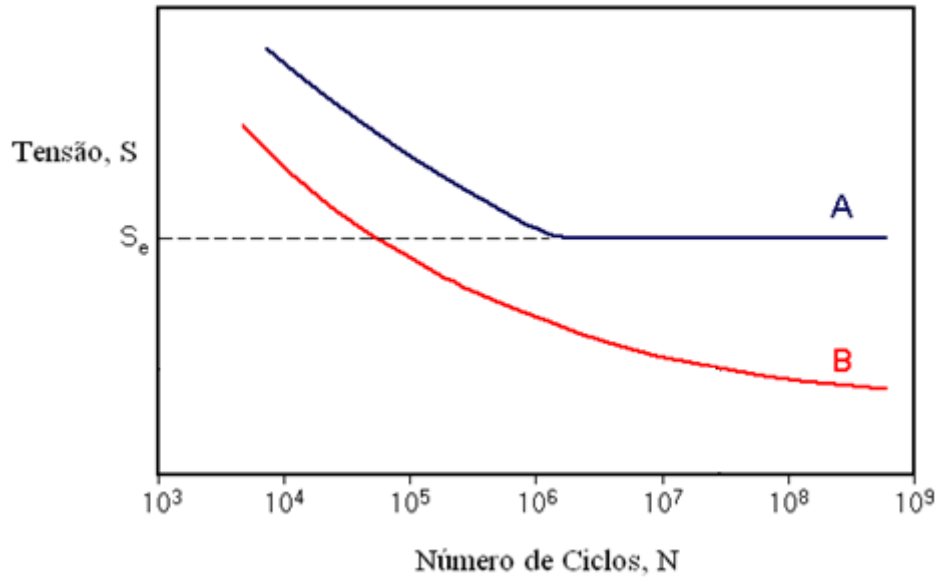


Figura 3.5 - Curvas SN ou curvas de Wöhler [28].

3.2. Dimensionamento à Fadiga

O cálculo da vida à fadiga com base em curvas S-N é feito através da utilização da Lei de Basquin. Esta lei permite através das propriedades mecânicas do material e da tensão alternada equivalente, calcular o número de ciclos do componente até à rotura. Esta lei é dada por (3.5).

$$N = \left(\frac{\sigma_{Alt_Eq}}{a} \right)^{-\frac{1}{b}} \quad (3.5)$$

em que σ_{Alt_Eq} é a tensão alternada equivalente, e a e b são parâmetros (do material que em primeira aproximação podem ser dados por (3.6) e (3.7).

$$a = \frac{(0,9\sigma_{ced})^2}{S_e} \quad (3.6)$$

$$b = -\frac{1}{3} \log \left(\frac{0,9\sigma_{ced}}{S_e} \right) \quad (3.7)$$

3.3. Critérios de Tensão Média

As curvas S-N ou de Wohler anteriormente mencionadas alteram-se quando os valores de tensão média do ciclo deixa de ser nula, situação esta que surge muita vez em casos

práticos. Quando a tensão média aumenta, o limite de fadiga sofre uma redução que pode ser estimada utilizando os critérios de Goodman, Soderberg ou Gerber. Estes critérios podem ser representados como a Figura 3.6 ilustra. Esta permite verificar se um determinado ciclo de tensões definido por (σ_a, σ_m) ou (R, σ_a) pode provocar ou não a rotura do material. Ao conjunto de pontos presentes na zona definida pelas três curvas e os eixos vertical e horizontal correspondem ciclos de carga para os quais não existe rotura por fadiga [19].

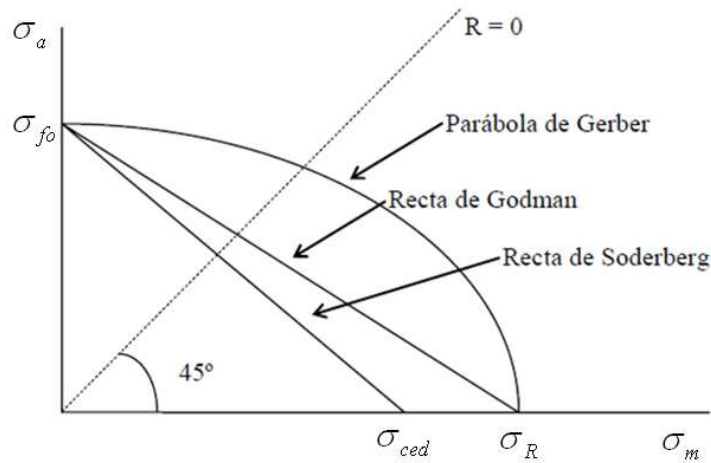


Figura 3.6 – Representação gráfica dos critérios de tensão média [19].

Os critérios representados na Figura 3.6, são dados por (3.8), (3.9) e (3.10).

$$\text{Goodman: } \sigma_a = \sigma_{f0} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_R} \right) \quad (3.8)$$

$$\text{Soderberg: } \sigma_a = \sigma_{f0} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{ced}} \right) \quad (3.9)$$

$$\text{Gerber: } \sigma_a = \sigma_{f0} \left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_R} \right)^2 \right) \quad (3.10)$$

em que σ_a e σ_m são respectivamente as tensões alternada e média, calculadas a partir das tensões máxima e mínima, σ_{ced} é a tensão de cedência do material, σ_R é a tensão de rotura do material e σ_{f0} é a tensão limite de fadiga para uma tensão média igual a zero.

Observando a Figura 3.6, pode-se afirmar que o critério de Soderberg é o mais conservativo, pois a área formada pela recta definida por este critério e os eixos ordenados xy é a menor. Esta menor área resulta da utilização da tensão de cedência, enquanto que os outros utilizam a tensão de rotura. Por sua vez o critério de Goodman é mais conservativo que o critério de Gerber, uma vez que a área por este abrangida é inferior à do critério de Gerber [29].

3.4. Regra de Miner

Uma vez obtida a vida útil do componente (número de ciclos até à rotura), a Regra de Miner permite calcular o dano devido à acção combinada de vários carregamentos, sendo dada por (3.11).

$$Dano = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (3.11)$$

em que n_i é o número de ciclos aplicado e N_i o número de ciclos que provocaria a rotura para o mesmo nível de tensão. Este valor de dano representa a influência de um determinado carregamento na vida à fadiga do componente, pois quanto menor for a diferença entre os valores de n_i e de N_i , maior será a redução da vida à fadiga do componente gerada pelo carregamento com ciclos [14].

3.5. Fadiga de Juntas Soldadas

O comportamento das juntas soldadas à fadiga é ditado por uma série de factores, tais como:

- Geometria da junta;
- Distribuição de tensões;
- Material;
- Ciclo de carregamento;
- Defeitos de soldadura;
- Ambiente.

3.5.1. Geometria da Junta

Em relação à geometria da junta, este pode ser de vários tipos, como apresentado no capítulo dos processos de soldadura (Figura 2.11 - Tipos de juntas e de chanfros [8]). Uma dada geometria adapta-se melhor a determinado tipo de soldadura bem como ao carregamento a que esta se encontra solicitada. Deste modo existe uma grande variedade de aplicações que diferem entre si quer em termos de geometrias quer em termos de carregamentos suportados. Cada combinação geometria/tipo de soldadura tem associada um determinado comportamento à fadiga. Quanto à geometria da junta soldada, pode ainda ser realizada uma análise mais detalhada que se prende com a análise da geometria do próprio cordão e a sua concordância com o material base.

3.5.2. Distribuição de Tensões

A distribuição de tensões é outro factor que influencia bastante o comportamento à fadiga das juntas soldadas. Esta distribuição é também de certo modo consequência da geometria da junta soldada e de toda a estrutura a que esta se encontra associada. Uma diminuição da vida à fadiga pode ser originada pelo efeito de entalhe, ou seja, uma excessiva concentração de tensões localizada numa zona, que pela sua geometria é propícia a este fenómeno. Esta concentração de tensões pode também ser gerada por uma geometria da junta mal definida ou por algum defeito de soldadura localizado.

3.5.3. Material

O material utilizado na junta também influencia bastante o seu comportamento à fadiga, pois consoante o material assim será a sua tensão de limite de fadiga. Existem materiais, como é o caso de alguns alumínios, para os quais a tensão limite de fadiga não se encontra definida. Dependendo da aplicação e do carregamento a que a junta vai estar sujeita é assim seleccionado o material a utilizar na estrutura soldadura.

3.5.4. Ciclo de Carregamento

O ciclo de carregamento é também determinante na vida à fadiga de uma estrutura, componente ou junta. Como foi já referido anteriormente, existe uma infinidade de possíveis ciclos de carregamento que podem ser aplicados. Um ciclo de carga com cargas superiores poderá não ser mais prejudicial para a junta soldada do que outro com valores de cargas mais pequeno mas com diferentes características (frequência, amplitude de carga, etc). Deve haver um estudo prévio do ciclo de carregamento a que a soldadura estará sujeita, para que esta possa ser dimensionada de modo a suportar o ciclo de carregamento sem que sofra rotura por fadiga. Foi já anteriormente mencionado (Sub-capítulo 3.1) que a análise de ciclos de carregamento complexos passa pela simplificação destes para casos mais simples.

Um outro factor que deverá ser tido em conta é a forma como os ciclos são aplicados no caso da realização de um ensaio de fadiga. Neste caso, os ciclos são geralmente aplicados em blocos não traduzindo uma situação real em que há variação de vários factores anteriormente mencionados como a frequência, amplitude de carga e outros.

3.5.5. Defeitos de Soldadura

Os diferentes defeitos de soldadura, foram já anteriormente identificados e descritos. No entanto é importante frisar que estes são os principais condicionantes da vida à fadiga de uma soldadura. Os restantes factores apresentados são também influentes na vida à fadiga,

mas apenas têm um papel relevante quando se trata de uma soldadura isenta de defeitos ou com um nível de defeitos que para o caso em questão seja considerado aceitável.

3.5.6. Ambiente

O ambiente é também um importante factor na vida à fadiga das juntas soldadas. Não apenas quando se trata de ambiente em que a soldadura se encontra durante a sua vida útil mas também no ambiente em que esta é fabricada. No caso por exemplo de um ambiente corrosivo, salino ou excessivamente húmido, estes serão prejudiciais para a soldadura, diminuindo consideravelmente a resistência à fadiga.

No caso da corrosão (Figura 3.7), esta surge geralmente no próprio cordão de soldadura, pois o material nesta zona vê as suas propriedades alteradas relativamente à restante estrutura, ficando esta zona mais vulnerável em termos de resistência à corrosão.

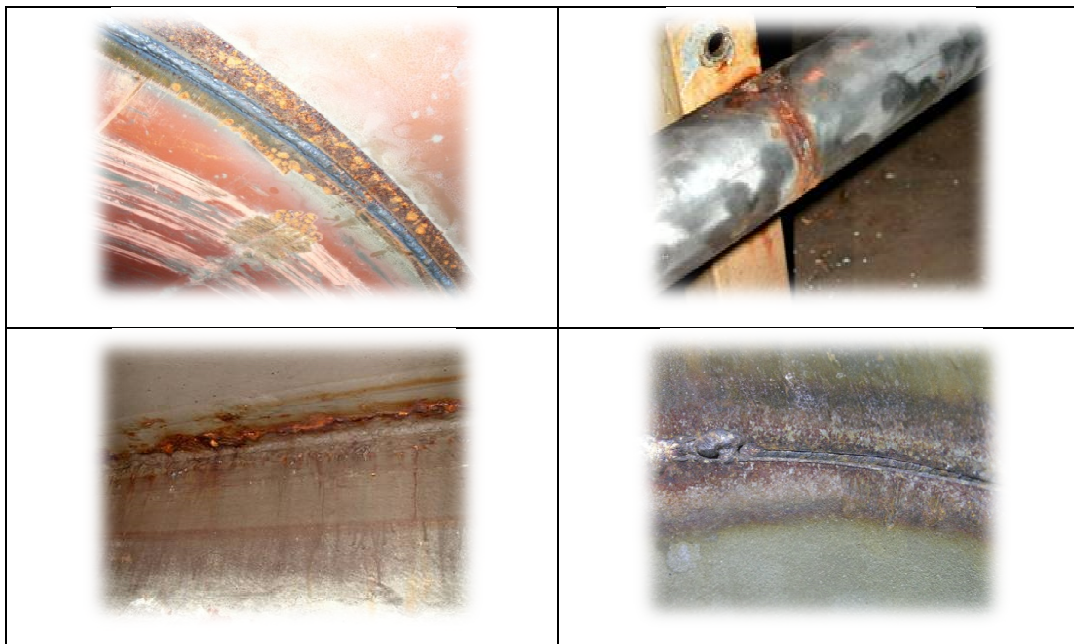


Figura 3.7 - Exemplos de corrosão em soldadura [31,32,33].

Capítulo 4

Análise da Norma NF EN 14766

Foi feito um estudo da norma NF EN 14766 de modo a verificar quais os ensaios pré-definidos, bem como as condições da sua realização. Para o caso do projecto em análise, foram identificados três ensaios de fadiga que serão realizados à bicicleta: ensaio de pedalagem (Ensaio 1), ensaio de carga horizontal (Ensaio 2) e ensaio de carga vertical (Ensaio 3). Estes ensaios encontram-se identificados nos sub-capítulos seguintes.

A norma EN14766 foi utilizada como sendo a referência em termos de requisitos para a realização de ensaios ao quadro da bicicleta. Dela foram retiradas todas as condições de carregamento e de apoio do quadro para cada um dos ensaios que se encontram descritos em pormenor mais à frente neste capítulo. Esta norma tem como objectivo definir as exigências de segurança e de desempenho a adoptar aquando da concepção e projecto de bicicletas destinadas a uma utilização fora de estrada e todo o terreno. A norma aplica-se apenas a bicicletas cujo selim pode ser regulado de modo a localizar-se a uma altura do solo de 635mm, existindo outras normas similares para aplicação a bicicletas de diferentes dimensões. Esta norma não contempla a análise de bicicletas utilizadas em competição ou equipadas para situações extremas como “downhill” ou acrobacias.

4.1. Ensaio 1 - Pedalagem

Este ensaio representa os esforços no quadro da bicicleta quando esta se encontra sujeita às forças de pedalagem. A força de 1200N identificada na Figura 4.1, representa a força aplicada alternadamente nos pedais pelo ciclista. Para a realização deste ensaio é definido na norma um mecanismo que representa o próprio pedal, estando também previsto um tirante, identificado na Figura 4.1 com o número 6, que simula a corrente. Em termos de especificações definidas pela norma para este ensaio, o quadro deverá suportar 50000 ciclos, correspondendo cada ciclo à aplicação das duas forças de pedalagem alternadamente.

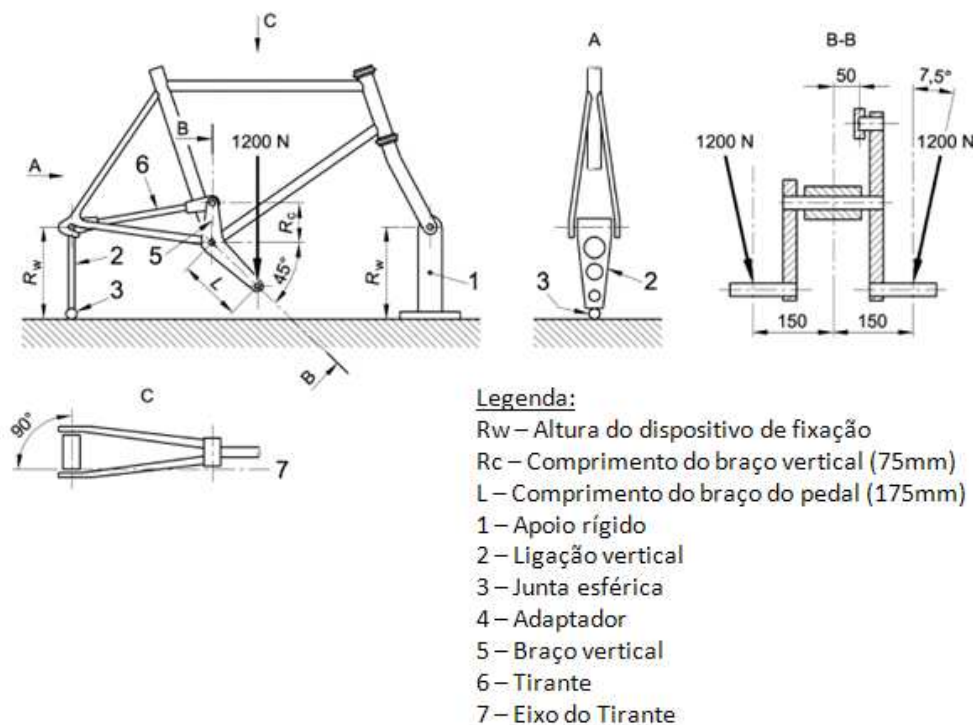
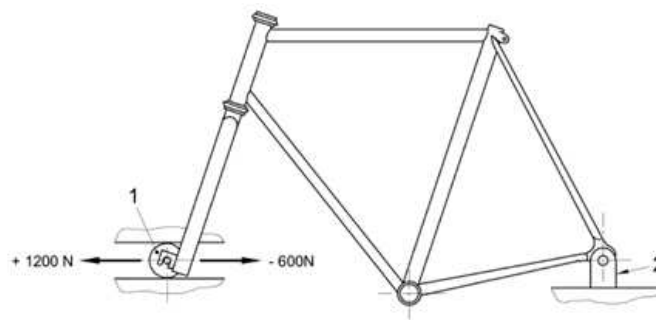


Figura 4.1 - Ensaio 1 (Pedalagem) [34].

Para efeitos de cálculo e ensaio este carregamento é dividido em dois tipos: solicitação no pedal direito e solicitação no pedal esquerdo, identificados mais à frente por ensaios 1.1 e 1.2 respectivamente.

4.2. Ensaio 2 – Carga horizontal

Neste ensaio, são retratos os esforços que simulam uma situação em que a bicicleta circula, por exemplo, num piso degradado. À semelhança do ensaio anterior, o quadro deverá resistir 50000 ciclos, considerando uma força horizontal aplicada ciclicamente entre 1200N e - 600N, conforme representado na Figura 4.2.



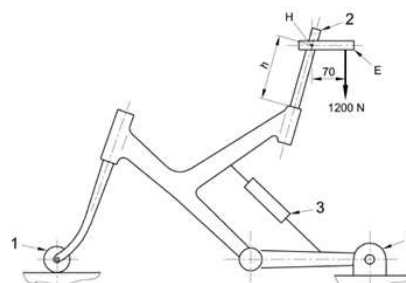
Legenda:

- 1 – Apoio simples, permitindo deslocamento horizontal
- 2 – Apoio rígido, restringindo todos os deslocamentos

Figura 4.2 - Ensaio 2 (Carga Horizontal) [34].

4.3. Ensaio 3 – Carga vertical

Este ensaio retrata a aplicação do peso do ciclista sobre o quadro da bicicleta. Para tal é utilizado um elemento de ligação entre o ponto de aplicação da força e o quadro, no qual é aplicada uma carga vertical de 1200N que representa o peso do ciclista (Figura 4.3). Esta força é aplicada ciclicamente entre 0 e 1200N, durante 50000 ciclos. Na norma está previsto o ensaio de uma bicicleta com suspensão traseira, o que não acontece no caso em estudo, não sendo assim necessário usar mecanismo de bloqueio da suspensão.



Legenda:

- 1 – Apoio simples, permitindo deslocamento horizontal
- 2 – Tubo em aço
- 3 – Sistema de bloqueio da suspensão
- 4 – Apoio rígido, permitindo rotação

Figura 4.3 - Ensaio 3 (Carga Vertical) [34].

Capítulo 5

Determinação da Secção do Quadro mais Solicitada

Neste capítulo foi utilizado o método dos elementos finitos para a identificação da secção mais solicitada, e obtenção de cargas no quadro da bicicleta. Simularam-se computacionalmente as várias situações de carga descritas no capítulo 4, e aplicando os critérios de dimensionamento à fadiga descritos no capítulo obtiveram-se as secções mais solicitadas e os respectivos esforços.

5.1. Modelação do Quadro Pelo Método dos Elementos Finitos

Foi criado um modelo sólido 3d do quadro utilizando o programa Catia V5, que está representado na Figura 5.1. Foram identificados dez elementos estruturais com secções transversais diferentes (ver Figura 5.1) cujas propriedades foram obtidas directamente a partir do modelo 3d, e se encontram representadas na Tabela 5.1.

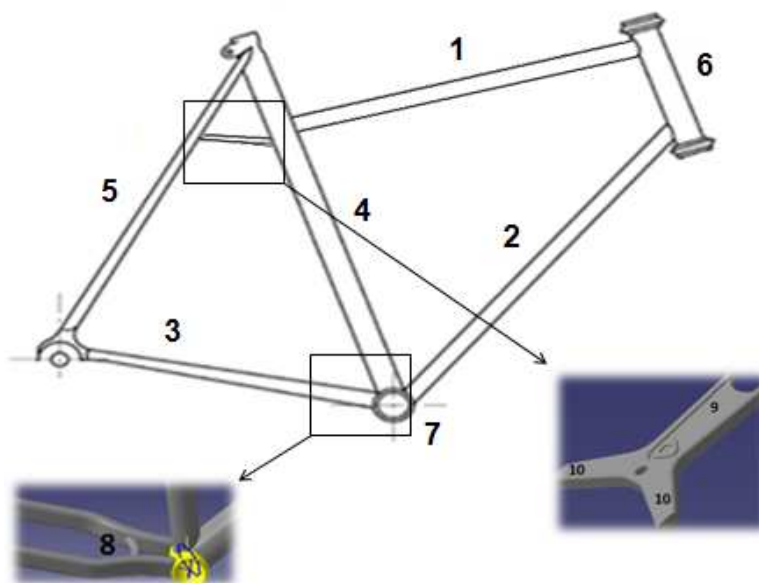


Figura 5.1 – Modelo sólido do quadro da bicicleta.

Tabela 5.1 - Propriedades das secções.

Secção	1	2.1	2.2	3	4	5	6	7	8	9	10
A[mm ²]	238.2	244.30	277.50	113.00	254.50	97.26	412.30	632.40	624.50	151.90	94.00
t[mm]	1.8	1.80	1.80	1.80	2.50	1.80	3.50	2.50	1.80	---	---
I _y [mm ⁴]	45400	62070	51840	3305	33590	1882	73110	128300	949.	9050	1417
I _z [mm ⁴]	47990	48970	106700	7219	33590	4742	73110	128300	949.	469	377
h[mm]	38.00	38.00	56.72	23.74	34.90	21.28	41.00	45.00	12.80	7.00	7.00
c[mm]	30.00	46.00	30.00	15.00	34.90	12.00	41.00	45.00	12.80	25.82	13.58

A direcção x é a direcção segundo o eixo longitudinal do elemento, a direcção y é a direcção perpendicular a x no plano do quadro e a direcção z é a direcção perpendicular ao plano do quadro e forma com x e y um sistema de eixos directo. Os valores de h e c representam, respectivamente a altura (dimensão segundo y) e a largura (dimensão segundo z) da secção. O troço 2 do quadro da bicicleta apresenta secção variável. Para efeitos de cálculo foram determinadas as propriedades das extremidades deste troço, sendo que a

secção 2.1 é a secção inferior do troço e a secção 2.2 é a secção superior, tendo-se considerado que a variação da secção é linear. Em Anexo II foi feito um estudo para validar a utilização de elemento 3d de secção variável. As restantes propriedades do material encontram-se no Anexo I.

Para efectuar a análise estrutural do quadro, a sua geometria foi exportada em formato IGES para o programa de elementos finitos CosmosM. A discretização foi efectuada por elementos de viga 3d (elemento beam3d da biblioteca de elementos do CosmosM) com dois nós e seis graus de liberdade por nó: 3 deslocamentos (u , v e w) e três rotações (Θ_x , Θ_y e Θ_z), respectivamente segundo os eixos x , y e z . Na Figura 5.2 está representado o elemento com os respectivos graus de liberdade. Refira-se ainda que este elemento possui um terceiro nó para orientação (o eixo x e o terceiro nó definem a direcção e sentido do eixo y).

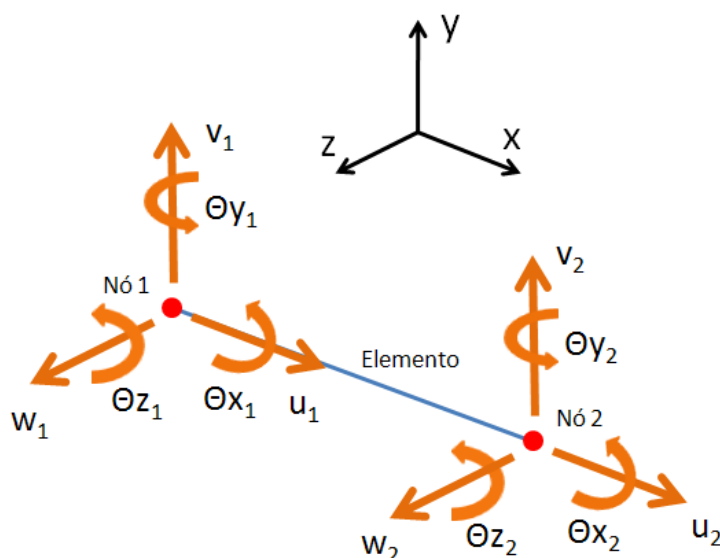


Figura 5.2 - Elemento de viga beam3d [16].

O número de elementos em que cada troço do quadro foi discretizado teve em conta a sua geometria, ou seja, em zonas com geometrias rectas foi utilizado apenas um elemento, enquanto que nas zonas com geometrias curvas foi utilizado um maior número de elementos de modo a aproximar o modelo à geometria original do quadro. Na Figura 5.3, encontra-se representado o modelo de elementos finitos utilizado, constituído por 149 elementos e 145 nós. Trata-se de um modelo base onde não estão representados os mecanismos de aplicação das forças para os diferentes ensaios [16].

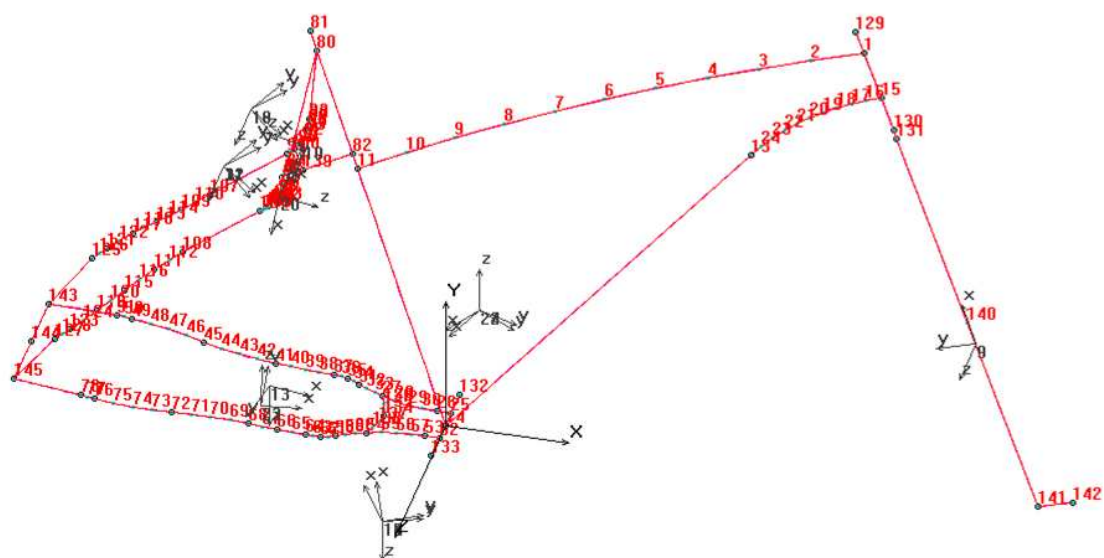


Figura 5.3 - Modelo CosmosM.

Com base neste modelo, foram criados outros quatro, cada um correspondente aos diferentes ensaios definidos pela norma, onde foram tidas em conta as condições de carregamento, os mecanismos a estes associados e as diferentes condições de apoio do quadro. Nas Figura 5.4 à Figura 5.7 podem-se observar os vários modelos para cada um dos ensaios, estando identificados os números dos nós onde foram aplicadas as cargas. Nas Tabelas 5.2 à 5.5 estão indicados os graus de liberdade que foram restringidos.

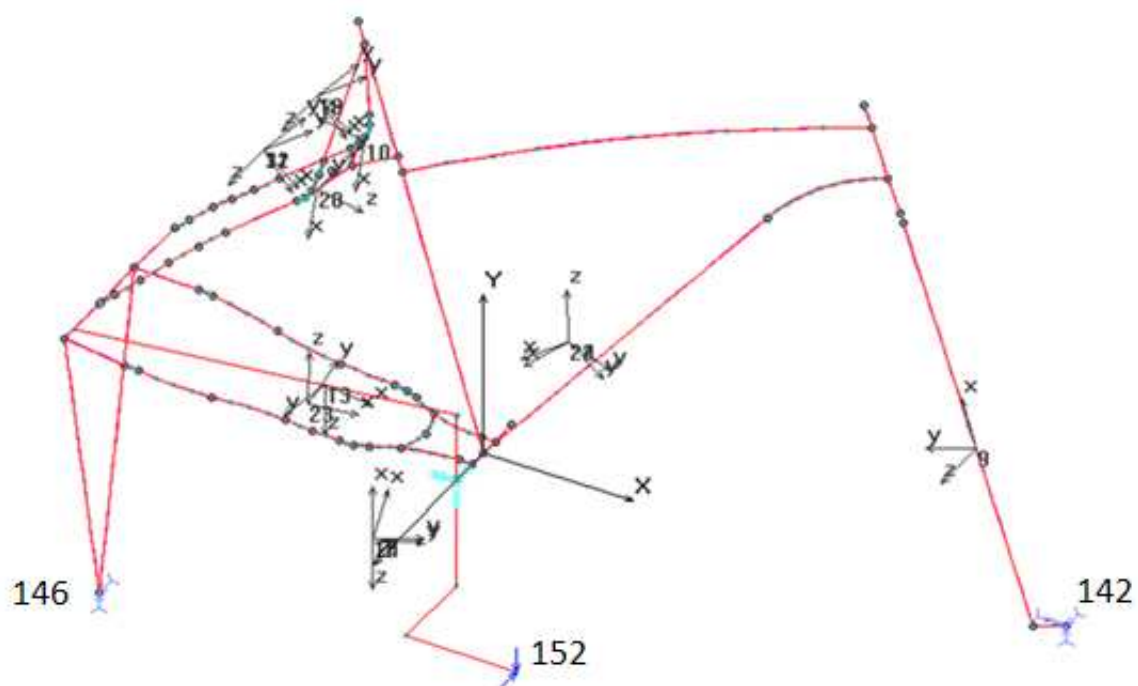


Figura 5.4 - Modelo CosmosM – Ensaio 1.1.

Tabela 5.2 - Condições de fronteira - Ensaio 1.1.

Ensaio 1	Graus de liberdade imobilizados						Cargas		
	Deslocamento			Rotação			Força [N]		
Nó	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
142									
146									
152								-1189.73	-156.63

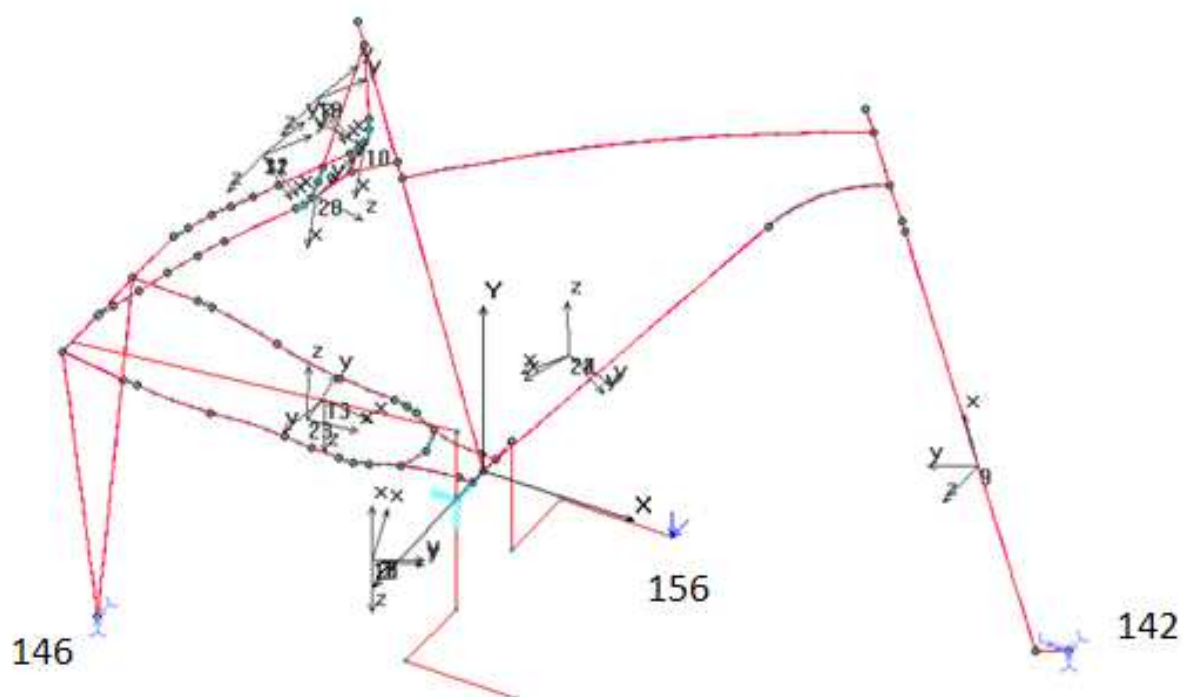


Figura 5.5 - Modelo CosmosM – Ensaio 1.2.

Tabela 5.3 - Condições de fronteira - Ensaio 1.2.

Ensaio 1	Graus de liberdade imobilizados						Cargas		
	Deslocamento			Rotação			Força [N]		
Nó	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
142									
146									
152								-1189.73	156.63

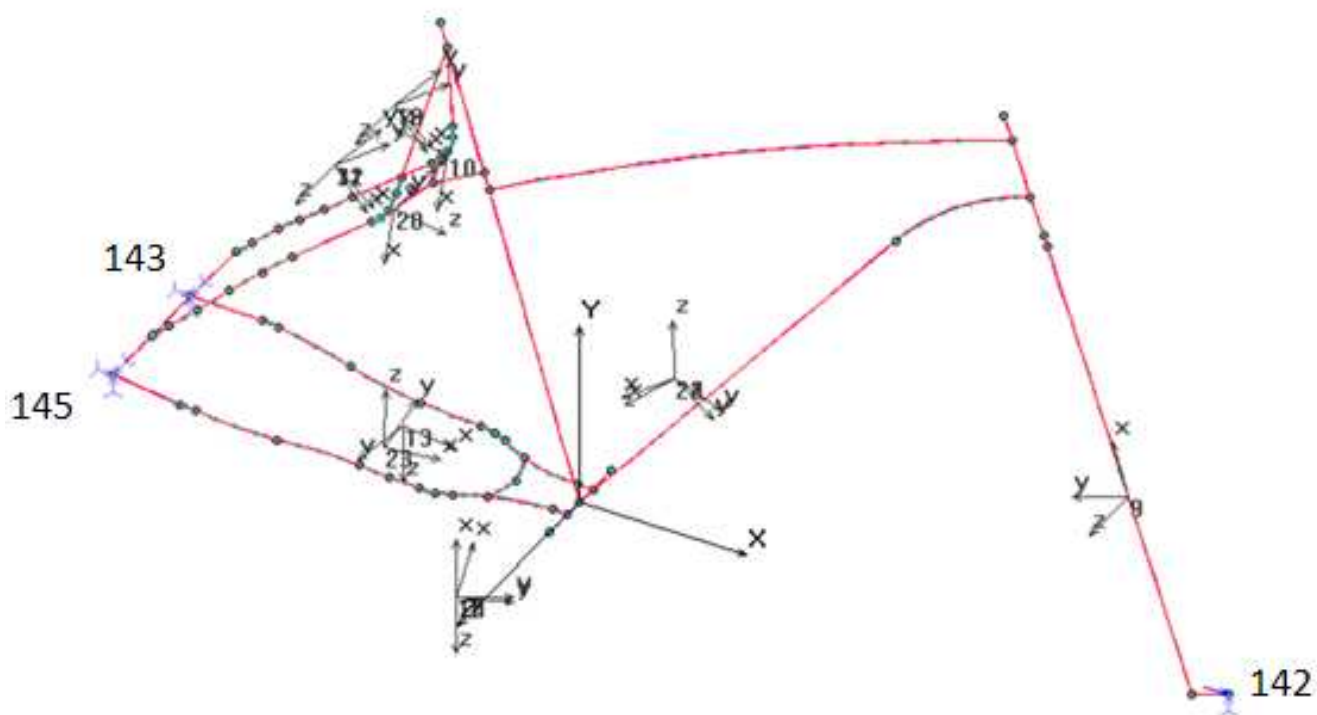


Figura 5.6 - Modelo CosmosM – Ensaio 2

Tabela 5.4 - Condições de fronteira - Ensaio 2.

Ensaio 2	Graus de liberdade imobilizados						Cargas		
	Deslocamento			Rotação			Força [N]		
Nó	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
142							1200.00		
143									
145									

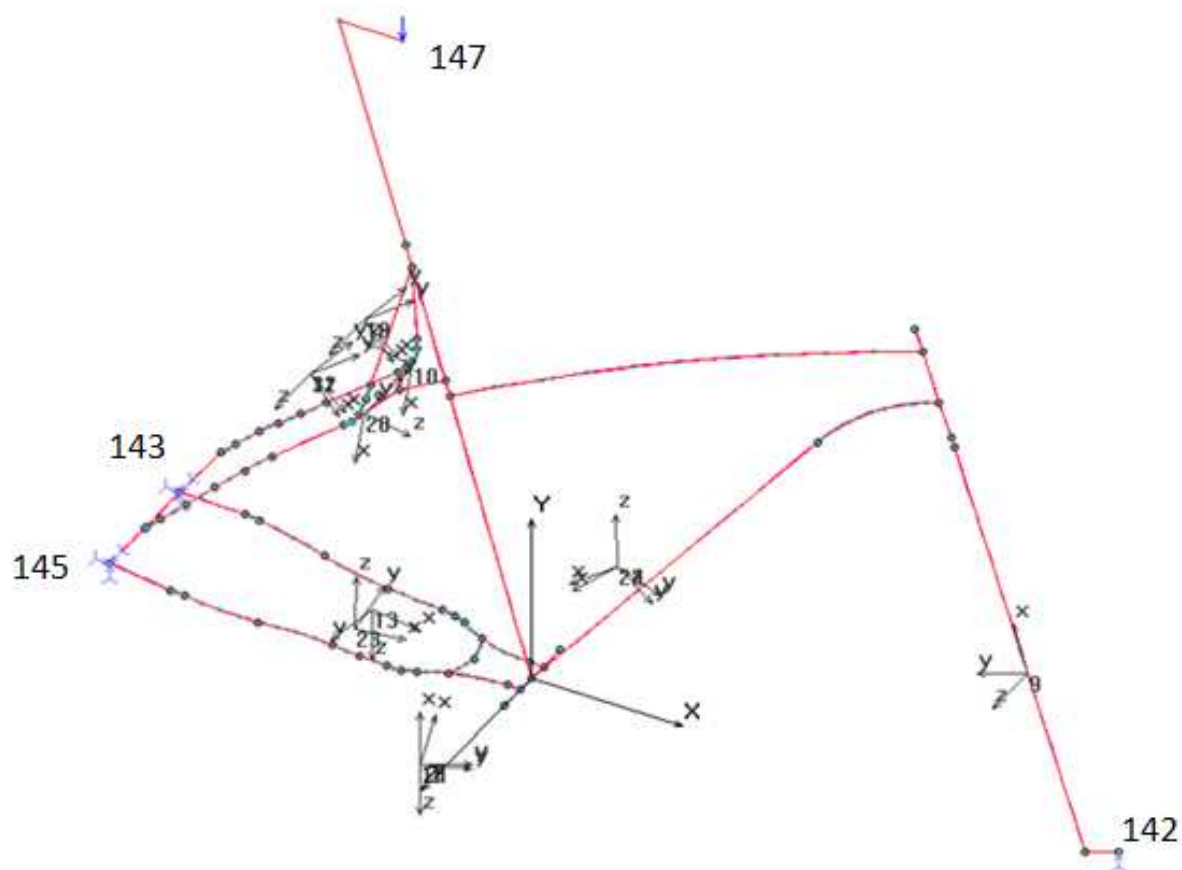


Figura 5.7 - Modelo CosmosM – Ensaio 3.

Tabela 5.5 - Condições de troneira - Ensaio 3.

Ensaio 3	Graus de liberdade imobilizados						Cargas		
	Deslocamento			Rotação			Força [N]		
Nó	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
142									
143									
145									
147								-1200.00	

5.2. Resultados Obtidos

Numa primeira fase a análise dos modelos incidiu na identificação das secções críticas para cada um dos ensaios para identificar as secções mais solicitadas. Para tal foi feita uma análise de tensões ao quadro da bicicleta. A distribuição das tensões normais encontra-se representada na Figura 5.8 à Figura 5.11. Na legenda destas Figuras surge a indicação de que as figuras representam as tensões principais em vez das tensões normais como referido anteriormente. Tal acontece devido ao facto de não se encontrarem representadas as tensões de corte, sendo assim as tensões principais são iguais às tensões normais presentes.

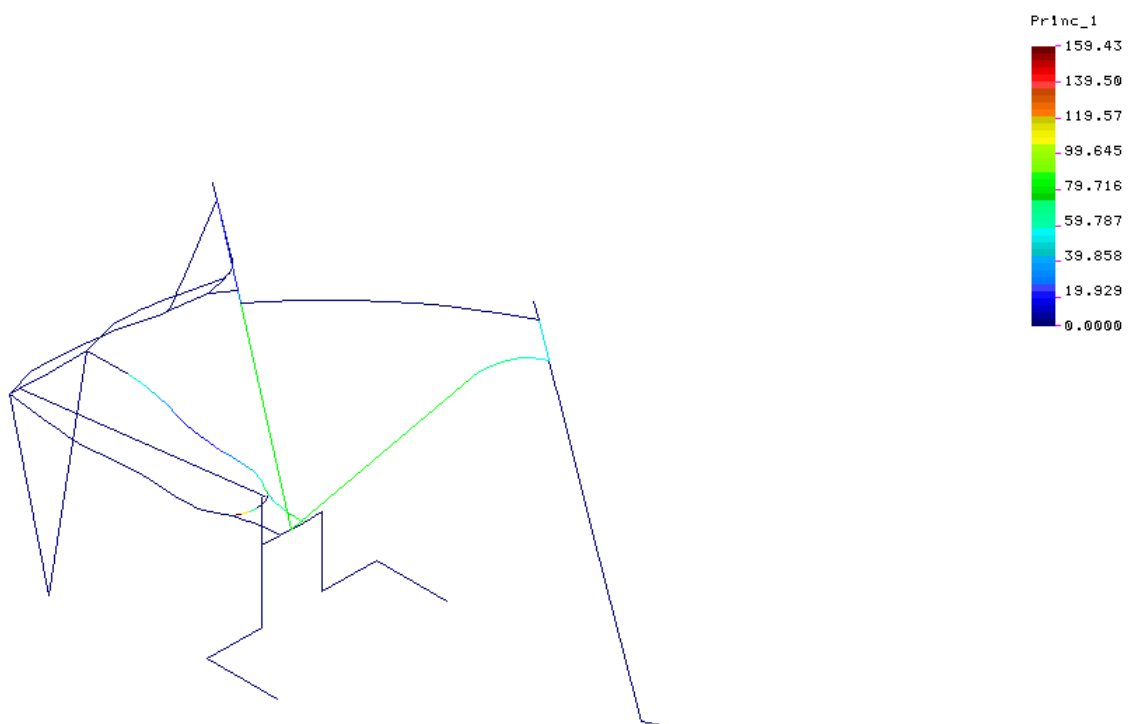


Figura 5.8 - Análise de tensões CosmosM – Ensaio 1.1.

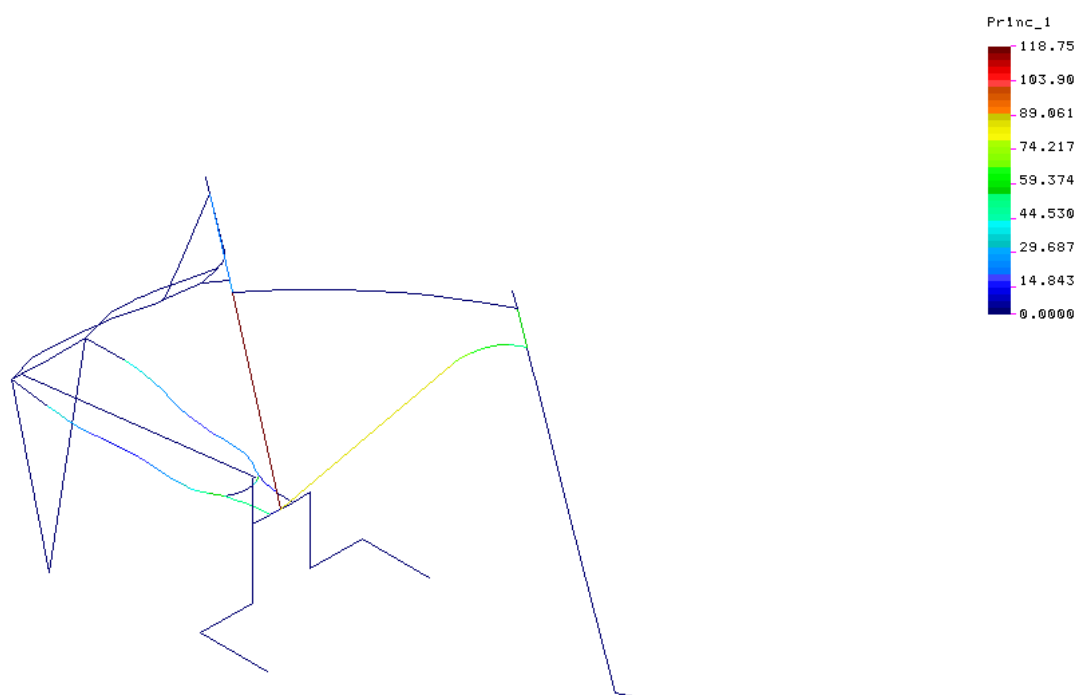


Figura 5.9 – Análise de tensões CosmosM – Ensaio 1.2.

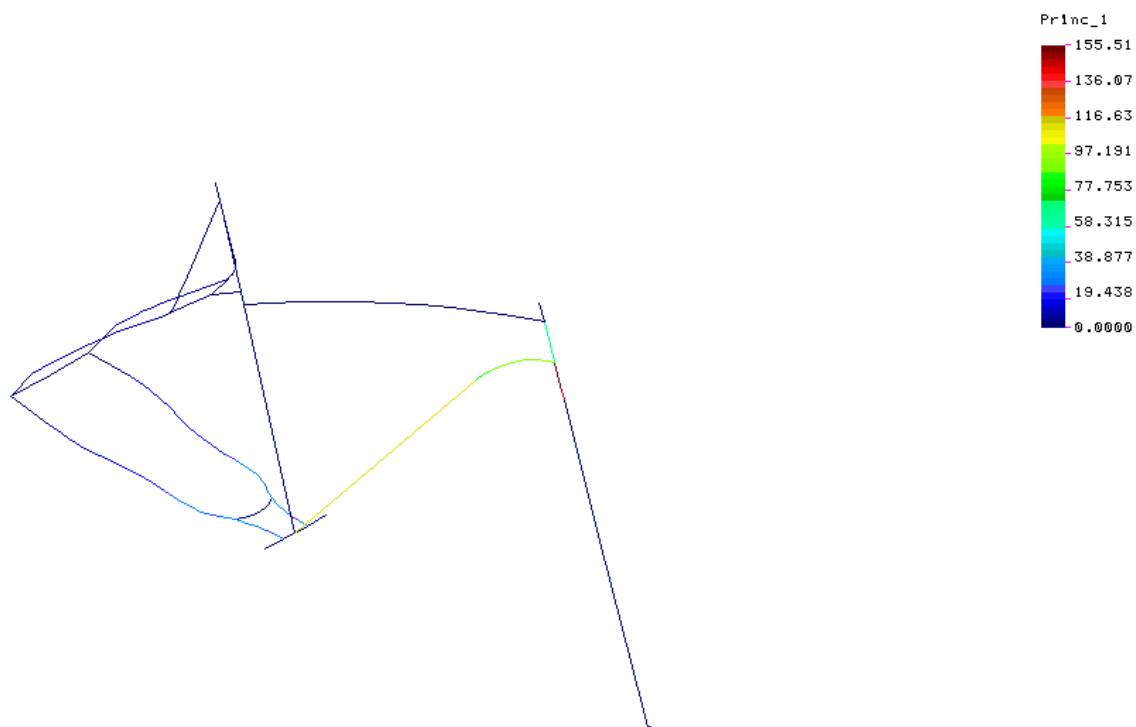


Figura 5.10 - Análise de tensões CosmosM – Ensaio 2.

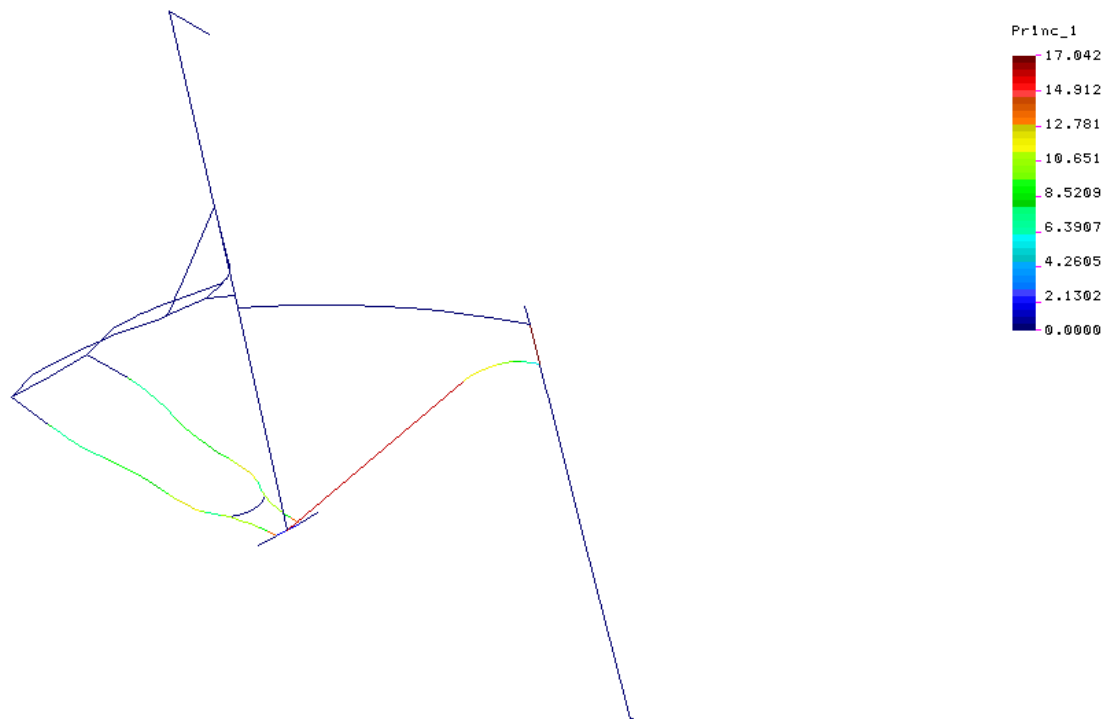


Figura 5.11 - Análise de tensões CosmosM – Ensaio 3.

Nas Figura 5.12 e 5.13 encontram-se identificadas as diferentes juntas analisadas, com a respectiva numeração, sendo que os números inseridos em círculos vermelhos correspondem ao número dos nós e os números a preto correspondem ao número dos elementos.

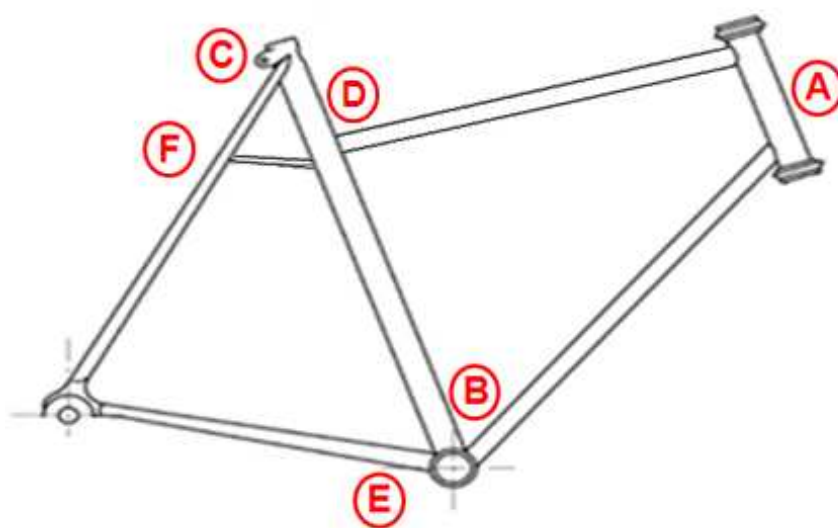


Figura 5.12 - Identificação das juntas soldadas do quadro.

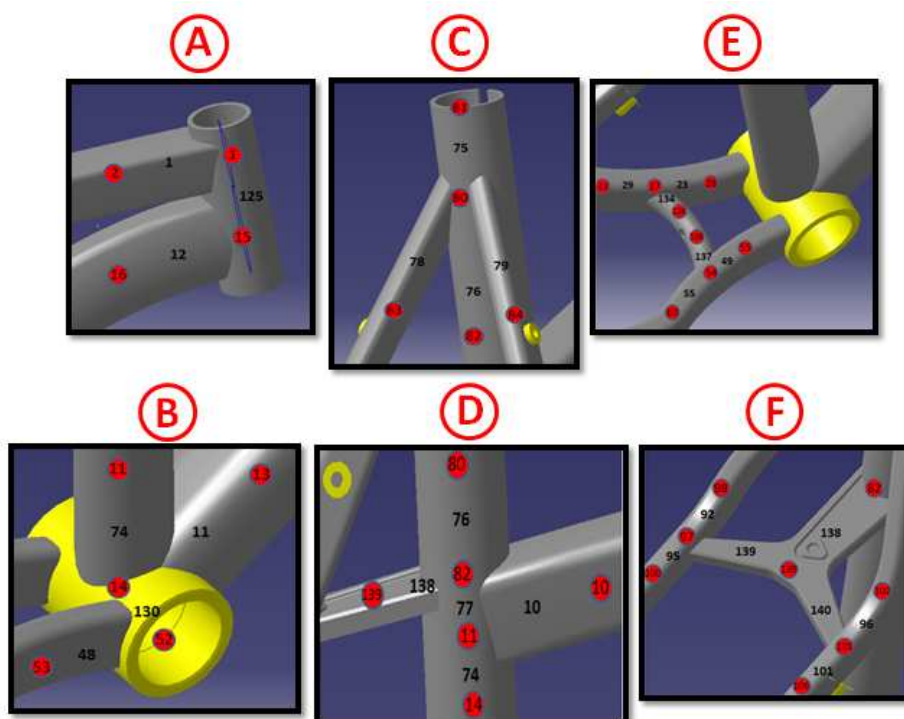


Figura 5.13 - Identificação dos elementos e nós utilizados na análise das juntas soldadas do quadro.

Os valores obtidos da análise de elementos finitos (Força Normal, Esforço Transverso segundo y e segundo z, Momento Torsor, Momento Flector segundo y e segundo z e os diversos esforços de corte) foram exportados para uma tabela de Excel. Posteriormente foram calculadas as várias componentes da tensão normal e de corte.

A tensão devido à força normal é obtida por (5.1).

$$\sigma_F = \frac{F}{A} \quad (5.1)$$

em que F é a força normal e A é a área da secção da junta a analisar.

A tensão normal máxima devido ao momento flector segundo y é obtida por (5.2).

$$\sigma_{My} = \frac{M_y \times y}{I_z} \quad (5.2)$$

e a tensão normal máxima obtida devido ao momento flector segundo z é obtida por (5.3).

$$\sigma_{Mz} = \frac{M_z \times z}{I_y} \quad (5.3)$$

As tensões de corte devidas ao momento torsor e aos esforços transversos em relação a z e a y foram obtidas respectivamente por (5.4), (5.5) e (5.6).

$$\tau_{Tr} = \frac{M}{2 \times t \times @} \quad (5.4)$$

$$\tau_{Vt} = \frac{V_t \times Q_z}{I_y \times 2 \times t} \quad (5.5)$$

$$\tau_{Vs} = \frac{V_s \times Q_y}{I_x \times 2 \times t} \quad (5.6)$$

5.3. Determinação da Secção Mais Solicitada

Para determinação da secção mais solicitada calculou-se o valor majorativo da tensão normal máxima (σ_N) por (5.7).

$$\sigma_N = \sigma_F + \sigma_{M_y} + \sigma_{M_z} \quad (5.7)$$

Os valores das tensões de corte não foram utilizados por terem pouca influência no processo de fadiga e porque apenas se pretende identificar a secção mais solicitada.

Com o valor da tensão normal máxima foram calculadas as tensões média e alternada recorrendo a (3.2) e (3.3). Utilizando os valores calculados anteriormente, foi aplicado o Critério de Goodman para obter a tensão alternada equivalente conforme (3.8).

Foi depois necessário obter o número de ciclos à fadiga que cada junta suportaria, para tal foi utilizada a Lei de Basquin que é dada por (3.6), (3.7) e (3.8), na qual são utilizadas as propriedades do material utilizado. As propriedades do material necessárias para aplicação da Lei de Basquin encontram-se no Anexo I que quando substituídas em (3.6) e (3.7) e por sua vez em (3.5), obtém-se:

$$N = \left(\frac{\sigma_{Alt_Eq}}{545,8} \right)^{\left(\frac{-1}{0,12542} \right)}$$

De modo a determinar qual a junta mais solicitada pela combinação dos vários ensaios definidos pela norma, calculou-se o dano de cada ensaio. Para tal foi utilizada a Regra de Miner, na qual é obtida o valor de dano que um determinado carregamento provoca no elemento por (3.11). Somando o dano obtido para cada uma das juntas, foi possível identificar qual a zona mais solicitada do quadro.

Nas Tabelas 5.6 a 5.11 são apresentados os valores de dano e de dano acumulado para cada secção.

Tabela 5.6 - Resultados da análise de elementos finitos e valores de tensão de normal e de corte obtidos para cada uma das seções estudadas.

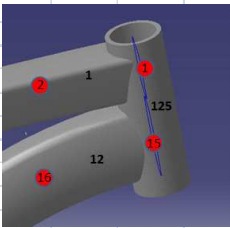
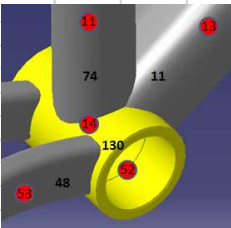
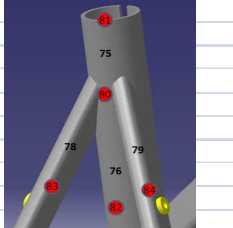
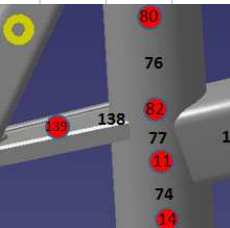
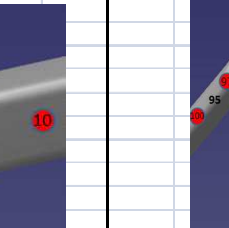
Ensaio 1.1 - Pedalagem																									
																									
		Elemento / Nó																							
Esforços		1-1	12-15	125-1	125-15	11-14	48-52	74-14	130-52	75-80	76-80	78-80	79-80	10-11	74-11	76-82	77-11	77-82	138-82	92-97	95-97	96-101	101-101	139-97	140-101
Fr [N]		1298	-1515	-147	147	1651	1952	331	274	0	384	-146	-361	-1302	-331	-384	-523	523	-816	138	-417	339	-816	151	200
Vs[N]		-139	680	1297	-1297	177	-46	169	-1353	0	316	-34	-79	-87	-169	-316	-1122	1122	44	38	12	103	90	131	169
Vt[N]		153	-233	153	-153	233	-120	153	-9	0	62	-6	19	-153	-153	-62	-1	1	-61	44	-69	-106	70	-213	462
Tr[Nm]		70.44	123.90	-81.86	81.86	-47.14	-10.29	27.19	13.37	0.00	7.02	-0.91	-2.93	-75.81	-27.19	-7.02	-24.17	24.17	-4.69	1.56	-3.19	2.34	-0.59	-1.34	0.94
Ms[Nm]		-81.41	139.50	69.93	-78.32	-29.08	-20.56	131.40	-14.69	0.00	1.59	-0.43	1.60	-19.59	-83.51	6.14	5.27	-5.26	-16.53	0.10	-7.92	3.64	4.81	6.96	-7.34
Mt[Nm]		-32.89	-16.57	-32.89	104.20	-25.56	-14.49	-25.78	167.60	0.00	-12.10	2.08	11.77	18.06	-27.01	-27.45	-45.06	25.43	-2.03	-1.95	3.18	0.19	0.34	3.58	4.65
Tensão N [MPa]		5.45	-5.46	-0.36	0.36	6.76	17.27	1.30	0.43	0.00	1.51	-1.50	-3.71	-5.47	-1.30	-1.51	-2.05	2.05	-5.37	1.42	-4.29	3.48	-8.39	1.60	2.13
Tensão Mz [MPa]		-13.02	-4.40	-9.22	29.22	-9.92	-23.83	-13.39	29.39	0.00	-6.29	4.66	26.41	7.15	-14.03	-14.26	-23.41	13.21	-15.10	-4.38	7.12	0.43	0.76	33.16	43.10
Tensão My [MPa]		-26.90	40.36	19.61	-21.96	-10.78	-46.66	68.26	-2.58	0.00	0.83	-1.37	5.11	-6.47	-43.38	3.19	2.74	-2.73	-23.58	0.33	-25.24	11.60	15.34	33.33	-35.18
Dano		0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%
Tensão corte (T) [MPa]		-8.95	-2.97	-4.25	13.48	-4.44	-13.48	-6.25	26.67	0.00	-2.94	2.90	16.45	4.91	-6.55	-6.66	-10.93	6.17	-13.13	-2.73	4.44	0.27	0.47	-8.16	5.76
Tensão corte (Vy) [MPa]		-1.24	4.52	6.25	-6.25	1.72	-0.75	1.32	-8.54	0.00	2.48	-0.63	-1.48	-0.78	-1.32	-2.48	-8.78	8.78	0.97	0.71	0.23	1.94	1.69	4.20	5.44
Tensão corte (Vz) [MPa]		1.81	-1.34	1.99	-1.99	2.99	-1.56	2.41	-0.20	0.00	0.97	-0.08	0.25	-1.81	-2.41	-0.97	-0.01	0.01	-18.23	0.58	-0.92	-1.40	0.93	6.83	-14.85

Tabela 5.7 - Resultados da análise de elementos finitos e valores de tensão de normal e de corte obtidos para cada uma das secções estudadas.

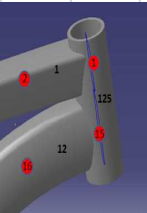
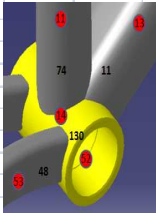
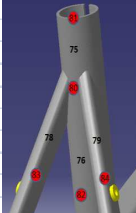
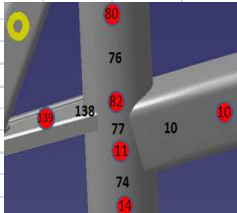
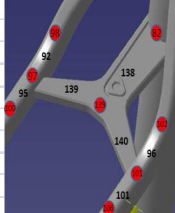
Ensaio 1.2 - Pedalagem																									
Esforços	Elemento / Nô																								
		1-1	12-15	125-1	125-15	11-14	48-52	74-14	130-52	75-80	76-80	78-80	79-80	10-11	74-11	76-82	77-11	77-82	138-82	92-97	95-97	96-101	101-101	139-97	140-101
Fr [N]		1164	-1383	-208	208	1570	-595	151	-36	0	327	-189	-255	-1181	-151	-327	-399	399	-429	184	-457	249	-371	142	14
Vs[N]		-201	746	1163	-1163	54	34	430	-41	0	302	-45	-80	-3	-430	-302	-726	726	24	51	31	50	-21	104	60
Vt[N]		-180	260	-180	180	-260	36	-202	-595	0	41	-24	3	180	202	-41	22	-22	-63	42	-55	-83	33	-238	129
Tr[Nm]		-68.89	-123.90	84.89	-84.89	-46.86	10.25	-18.47	-17.03	0.00	-1.23	1.21	-0.46	73.44	18.47	1.23	2.74	-2.74	1.35	-1.41	0.84	-1.72	2.64	-0.60	1.08
Ms[Nm]		84.45	-142.60	-68.36	78.26	-144.30	7.30	-137.00	-7.19	0.00	0.96	-1.62	0.21	32.09	73.75	4.18	4.83	-5.22	1.24	-0.04	-5.24	1.23	2.42	4.39	-3.34
Mt[Nm]		-52.43	-4.47	-52.43	116.40	-67.08	17.03	-89.83	10.33	0.00	-9.94	5.69	5.70	-4.70	-44.42	-27.80	-39.72	27.03	-0.77	-0.70	0.89	-5.82	6.91	3.18	1.43
Tensão N [MPa]		4.89	-4.98	-0.50	0.50	6.43	-5.27	0.59	-0.06	0.00	1.28	-1.94	-2.62	-4.96	-0.59	-1.28	-1.57	1.57	-2.83	1.89	-4.70	2.56	-3.82	1.51	0.15
Tensão Mz [MPa]		-20.76	-1.19	-14.70	32.64	-26.03	28.00	-46.67	1.81	0.00	-5.16	12.76	12.78	-1.86	-23.08	-14.44	-20.63	14.04	-5.75	-1.57	2.00	-13.06	15.51	29.49	13.27
Tensão My [MPa]		27.90	-41.26	-19.17	21.94	-53.47	16.57	-71.17	-1.26	0.00	0.50	-5.17	0.66	10.60	38.31	2.17	2.51	-2.71	1.77	-0.14	-16.72	3.92	7.70	21.03	-16.01
Dano		0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	0.00%	0.84%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Tensão corte (T) [MPa]		-14.27	-0.80	-6.78	15.06	-11.65	15.85	-21.79	1.64	0.00	-2.41	7.95	7.96	-1.28	-10.78	-6.74	-9.64	6.56	3.78	-0.98	1.25	-8.14	9.66	-3.67	6.60
Tensão corte (Vy) [MPa]		-1.80	4.95	5.60	-5.60	0.53	0.56	3.36	-0.26	0.00	2.36	-0.84	-1.50	-0.03	-3.36	-2.36	-5.68	5.68	0.53	0.96	0.58	0.94	-0.39	3.33	1.92
Tensão corte (Vz) [MPa]		-2.13	1.49	-2.34	2.34	-3.34	0.47	-3.18	-13.45	0.00	0.65	-0.32	0.04	2.13	3.18	-0.65	0.35	-0.35	-18.89	0.56	-0.73	-1.11	0.44	7.66	-4.15

Tabela 5.8 - Resultados da análise de elementos finitos e valores de tensão de normal e de corte obtidos para cada uma das secções estudadas.

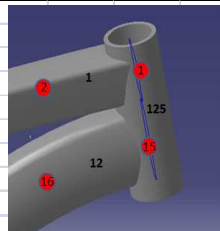
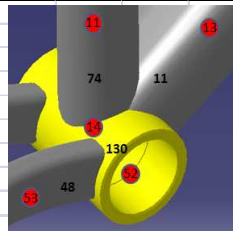
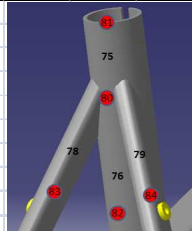
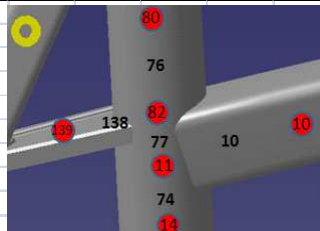
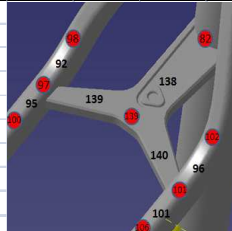
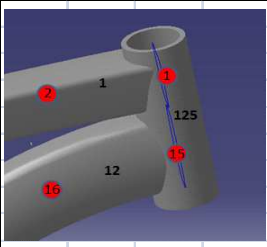
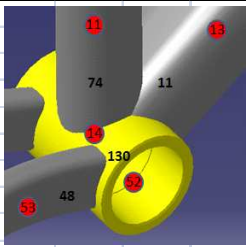
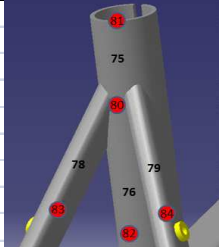
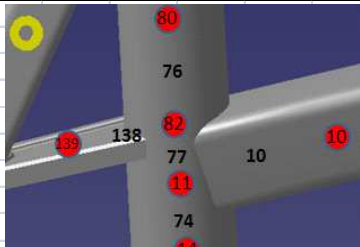
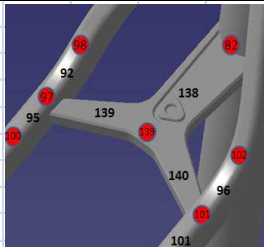
Ensaio2 - Garfo (1200N)																									
Esforços	Elemento / Nó																								
		1-1	12-15	125-1	125-15	11-14	48-52	74-14	130-52	75-80	76-80	78-80	79-80	10-11	74-11	76-82	77-11	77-82	138-82	92-97	95-97	96-101	101-101	139-97	140-101
Fr [N]		579	-1713	-525	525	1523	578	-538	-179	0	14	-7	-7	-660	538	-14	-7	7	46	5	17	5	17	-15	-15
Vs[N]		-522	87	576	-576	790	9	601	3	0	2	2	2	414	-601	-2	44	-44	-4	5	-14	5	-14	-7	-7
Vt[N]		0	0	0	0	0	-179	0	-578	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	2	3	-2	-3	17	-17
Tr[Nm]		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.74	0.00	-8.23	0.00	0.00	-0.06	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.08	-0.01	-0.09	0.08	-0.08
Ms[Nm]		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-3.42	0.00	3.43	0.00	0.00	-0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.32	-0.05	-0.32	-0.35	0.35
Mt[Nm]		-194	-325	-194	226	-128	8.23	-111.10	0.70	0.00	0.49	-0.28	-0.28	-76.50	-76.70	-0.75	-0.19	0.96	0.21	0.16	-0.24	0.16	-0.24	-0.16	-0.16
N [MPa]		2.43	-6.17	-1.27	1.27	6.23	5.12	-2.11	-0.28	0.00	0.05	-0.07	-0.07	-2.77	2.11	-0.05	-0.03	0.03	0.30	0.05	0.18	0.05	0.18	-0.16	-0.16
Mz [MPa]		-76.93	-86.44	-54.48	63.37	-49.51	13.54	-57.72	0.12	0.00	0.25	-0.63	-0.63	-30.29	-39.85	-0.39	-0.10	0.50	1.56	0.36	-0.54	0.36	-0.54	-1.47	-1.47
My [MPa]		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-7.77	0.00	0.60	0.00	0.00	-0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	1.02	-0.17	-1.01	-1.68	1.67
Dano		0.02%	0.07%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
Tensão corte (T) [MPa]		-52.87	-58.34	-25.13	29.23	-22.15	7.66	-26.95	0.11	0.00	0.12	-0.39	-0.40	-20.82	-18.61	-0.18	-0.05	0.23	0.00	0.22	-0.34	0.22	-0.34	0.48	-0.48
Tensão corte (Vy) [MPa]		-4.69	0.58	2.77	-2.77	7.68	0.15	4.70	0.02	0.00	0.02	0.04	0.04	3.72	-4.70	-0.02	0.34	-0.34	-0.10	0.09	-0.26	0.09	-0.27	-0.21	-0.21
Tensão corte (Vz) [MPa]		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-2.34	0.00	-13.07	0.00	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	-0.02	-0.05	-0.56	0.56

Tabela 5.9 - Resultados da análise de elementos finitos e valores de tensão de normal e de corte obtidos para cada uma das secções estudadas.

Ensaio 3 - Celim																									
Esforços	Elemento / Nó																								
		1-1	12-15	125-1	125-15	11-14	48-52	74-14	130-52	75-80	76-80	78-80	79-80	10-11	74-11	76-82	77-11	77-82	138-82	92-97	95-97	96-101	101-101	139-97	140-101
Fr [N]		690	-804	-107	107	889	-402	-734	-124	1148	-665	-321	-321	-698	734	665	603	-603	-591	308	-573	307	-573	106	106
Vs [N]		-103	385	690	-690	73	-38	28	33	351	65	-79	-79	-18	-28	-65	-657	657	71	80	7	85	17	96	96
Vt [N]		0	0	0	0	0	124	0	-402	0	0	-21	21	0	0	0	0	0	0	90	-62	-90	62	-262	263
Tr [Nm]		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.46	0.00	2.71	0.00	0.00	1.63	-1.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	-1.40	-0.17	1.49	-1.70	1.70
Ms [Nm]		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-2.39	0.00	2.38	0.00	0.00	-1.43	1.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.72	-5.37	0.72	5.34	5.55	-5.56
Mt [Nm]		-21.93	-3.17	-21.93	59.85	-5.08	-2.71	-10.51	-0.48	12.50	-21.19	5.35	5.35	-2.57	1.70	13.01	4.27	-15.77	-2.76	-5.72	7.34	-5.71	7.34	2.65	2.65
N [MPa]		2.90	-2.90	-0.26	0.26	3.64	-3.56	-2.88	-0.20	4.51	-2.61	-3.30	-3.30	-2.93	2.88	2.61	2.37	-2.37	-3.89	3.17	-5.89	3.16	-5.89	1.12	1.13
Mz [MPa]		-8.68	-0.84	-6.15	16.78	-1.97	-4.46	-5.46	-0.08	6.49	-11.01	12.01	12.01	-1.02	0.88	6.76	2.22	-8.19	-20.57	-12.83	16.47	-12.82	16.47	24.59	24.59
My [MPa]		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-5.42	0.00	0.42	0.00	0.00	-4.57	4.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-2.29	-17.10	2.28	17.03	26.61	-26.6
Dano		0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Tensão corte (T) [MPa]		-5.97	-0.57	-2.84	7.74	-0.88	-2.52	-2.55	-0.08	3.03	-5.14	7.48	7.48	-0.70	0.41	3.16	1.03	-3.83	0.00	-7.99	10.26	-7.99	10.26	-10.40	10.40
Tensão corte (Vy) [MPa]		-0.92	2.56	3.32	-3.32	0.71	-0.62	0.22	0.21	2.75	0.51	-1.49	-1.49	-0.16	-0.22	-0.51	-5.14	5.14	1.55	1.50	0.14	1.59	0.31	3.09	3.09
Tensão corte (Vz) [MPa]		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.62	0.00	-9.10	0.00	0.00	-0.28	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	1.19	-0.82	-1.19	0.82	8.43	-8.43

Nas Tabelas 5.10 e 5.11 encontram-se os valores de dano acumulado obtidos para cada uma das juntas do quadro, tendo sido através desta tabela que foi obtida a secção crítica, ou seja, aquela que apresenta um valor de dano acumulado superior.

Tabela 5.10 - Valores de dano obtidos.

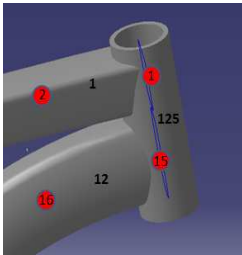
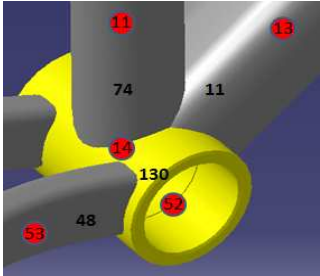
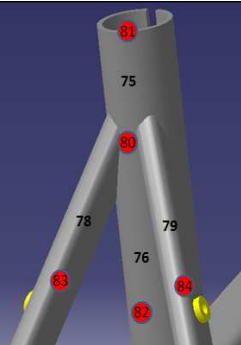
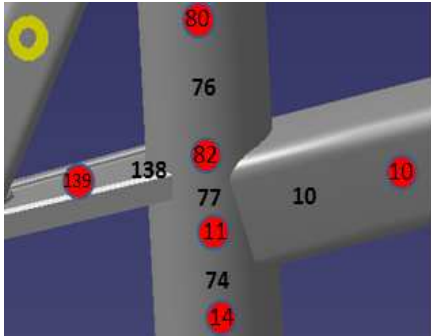
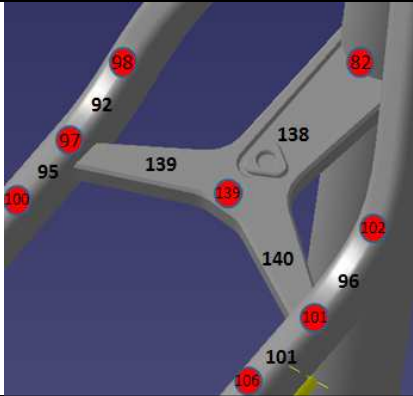
									
	1-1	12-15	11-14	48-52	74-14	75-80	76-80	78-80	79-80
Ensaio 1 (Dano)	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Ensaio 2 (Dano)	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ensaio 3 (Dano)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Dano Acumulado	0.06%	0.07%	0.00%	0.17%	0.10%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Tabela 5.11 - Valores de dano obtidos.

												
	10-11	74-11	76-82	77-11	77-82	138-82	92-97	95-97	96-101	101-101	139-97	140-101
Ensaio 1 (Dano)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Ensaio 2 (Dano)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ensaio 3 (Dano)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Dano Acumulado	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	0.07%

Verificou-se assim que a secção mais solicitada é o tubo horizontal que liga a zona de rotação dos pedais à roda traseira, do lado da corrente conforme é mostrado na Figura 5.14 e em detalhe na Figura 5.15, pois esta é a que apresenta o maior valor de dano acumulado.

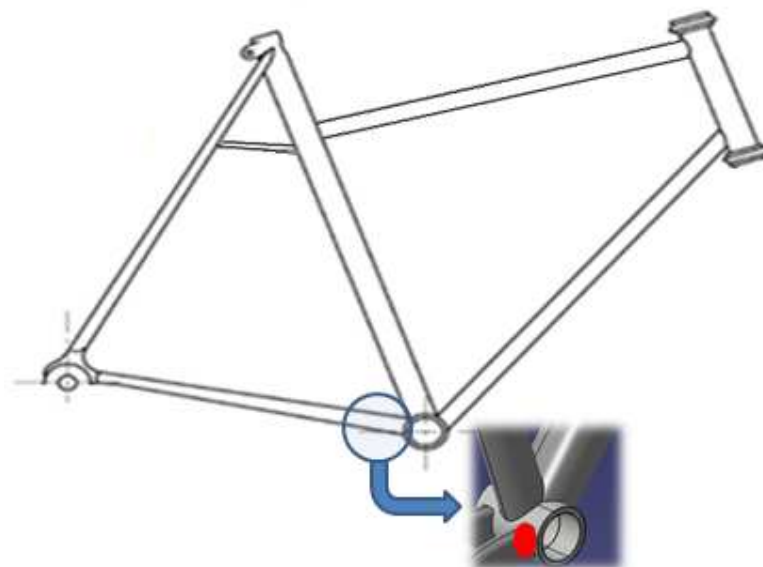


Figura 5.14 - Secção crítica.

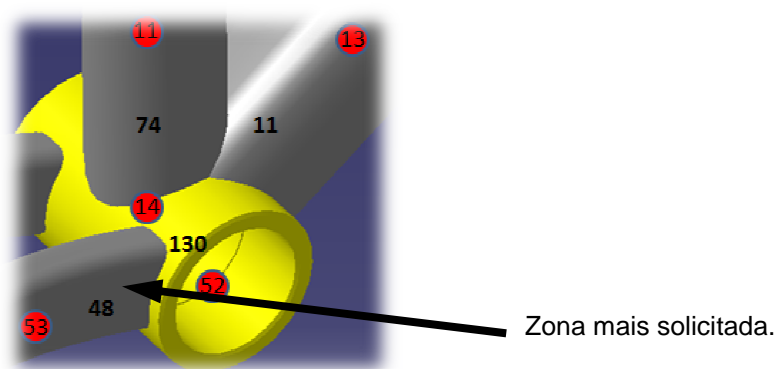


Figura 5.15 - Detalhe da secção crítica.

Na Tabela 5.12 encontram-se representados os esforços presentes na secção mais solicitada para cada um dos ensaios.

Tabela 5.12 - Esforços e tensões no tubo da secção crítica.

Ensaio	1.1		1.2		2		3	
Max/Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Fr [N]	1950	0	-595	0	578	-289	-402	0
Vs[N]	-45.5	0	3410	0	9,08	-4,54	-37,6	0
Vt[N]	-120	0	36	0	-179	89,4	124	0
Tr[N.mm]	-10300	0	10300	0	-738	369	-458	0
Ms[N.mm]	-20600	0	7300	0	-3420	1710	-2390	0
Mt[N.mm]	-14500	0	17000	0	8230	-4120	-2710	0
σ_{Fr} [MPa]	5.45	0	-5.27	0	5.12	-2.56	-3.56	0
σ_{Ms} [MPa]	-13.02	0	28.00	0	13.54	-6.77	-4.46	0
σ_{Mt} [MPa]	-26.90	0	16.57	0	-7.77	3.88	-5.42	0
τ_T [MPa]	-8.95	0	15.85	0	7.66	-3.83	-2.52	0
τ_{Vs} [MPa]	-1.24	0	0.56	0	0.15	-0.07	-0.62	0
τ_{Vt} [MPa]	1.81	0	0.47	0	-2.34	1.17	1.62	0

De todos os ensaios simulados ao quadro da bicicleta, o que dá origem a um maior dano é o de pedalagem, nomeadamente o ensaio 1.1 que é realizado com a aplicação de uma força no pedal do lado onde se encontra a corrente. Relativamente aos restantes ensaios (carga horizontal e carga vertical) estes têm um menor impacto na integridade estrutural do quadro da bicicleta.

A secção mais solicitada destaca-se das restantes por apresentar um valor de dano de 0,17%, enquanto que as restantes que apresentam valores de dano acumulado mais elevados situam-se nos 0,10 e 0,07%. A secção que apresenta 0,10% de dano acumulado situa-se na mesma zona da secção crítica e pode ser identificada na Tabela 5.10. Os 0,07% de dano acumulado encontram-se numa secção na zona da ligação com o guiador que pode ser identificada também na Tabela 5.10. Existe ainda outra secção que apresenta um valor de 0,07% de dano acumulado mas que não se considerou relevante tendo em conta a sua localização. Esta secção está identificada na Tabela 5.11 e é localizada na zona posterior do quadro da bicicleta. Estas secções apesar de apresentarem valores de dano inferiores à secção mais solicitada devem também ser alvo de atenção aquando da realização das soldaduras, pois poderão ser zonas onde poderão surgir fissuras originadas por fadiga.

Capítulo 6

Ensaaios de Fadiga

Neste capítulo irão ser apresentados os equipamentos utilizados na realização dos ensaios de fadiga, como a máquina de ensaios, o sistema de amarras e os provetes. Irão também ser calculados os esforços a aplicar em cada um dos ensaios que simulam os ensaios definidos pela norma (pedalagem, carga vertical e carga horizontal). Posteriormente à realização dos ensaios foi feita uma análise metalográfica e um teste utilizando líquidos penetrantes para se poderem obter conclusões sobre os ensaios realizados.

6.1. Máquina de Ensaios

A máquina utilizada para a realização dos ensaios de fadiga foi uma servo-hidráulica INSTRON® 1382 equipada com um controlador Fast Track 8800® ligado a um computador. Esta máquina é uniaxial e permite a aplicação de cargas dinâmicas até frequências na ordem dos 20Hz, dependendo dos deslocamentos exigidos. Como principais características de hardware esta máquina apresenta:

» Grupo de Alimentação

- INSTRON® 3411
- Pressão de Óleo 210 bar
- Capacidade 88 l/min

» Corpo Principal

- INSTRON® 1382
- Duas colunas
- Amarras hidráulicas
- Capacidade +/- 250 KN dinâmicos
- Actuador hidráulico +/- 75 mm
- Duas servo-válvulas MOOG®

» Célula de Carga

- INSTRON® 2518-110
- Capacidade +/- 250 KN dinâmicos

» Controlador

- INSTRON Fast Track 8800®
- Capacidade de controlo em Carga, Deslocamento e dois canais de Extensão
- Resolução 19bits
- Precisão 0.5%
- Ajuste adaptativo PID

Na Figura 6.1 e Figura 6.2 encontram-se respectivamente o controlador e o corpo principal da máquina de ensaios anteriormente descritos, estando a máquina com um provete H montado para a realização de um ensaio.



Figura 6.1 - Controlador INSTRON Fast Track 8800®.



Figura 6.2 - Máquina de ensaios servo-hidráulica com provete montado.

6.2. Ensaio de Provetes H

6.2.1. Provetes H

Os provetes nos quais foram realizados os ensaios apresentam a forma de H e encontram-se representados na Figura 6.3. Estes provetes foram fabricados a partir de tubo de alumínio, liga 6061 tendo sido sujeitos a tratamento térmico T6 após soldadura.

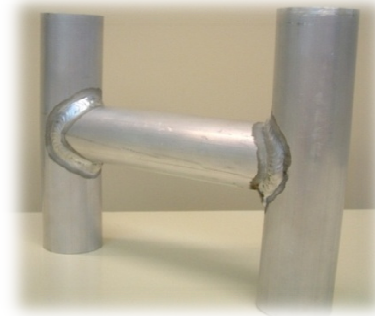


Figura 6.3 - Provete H.

Em termos de propriedades da secção, para serem determinadas as cargas a aplicar nos provetes, foram calculadas a área e o momento de inércia, tendo sido obtidos os valores presentes na Figura 6.4.

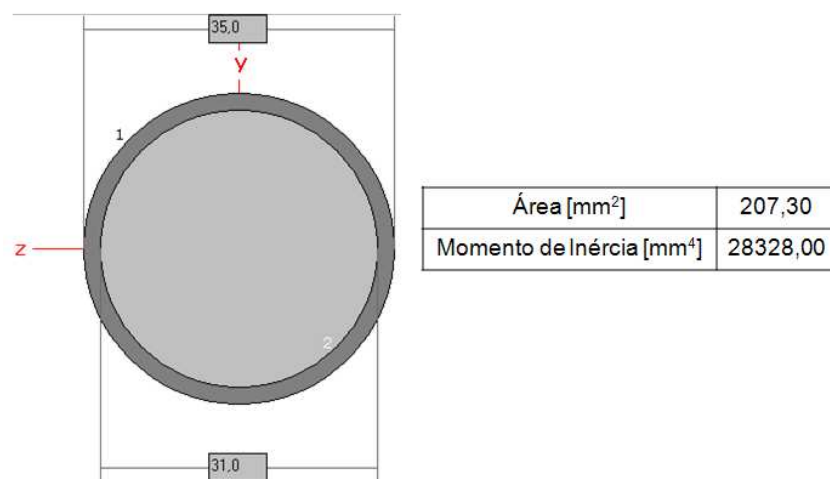


Figura 6.4 - Propriedades da secção do provete em H.

Na Figura 6.5 encontra-se um desenho 2D com as dimensões dos provetes utilizados. Estes provetes foram obtidos através do processo de soldadura MIG sendo realizadas duas

soldaduras em cada um dos provetes de modo a unir o tubo central com os restantes. O processo de soldadura foi automatizado com os parâmetros que irão posteriormente ser utilizados na construção dos quadros de bicicleta. Para a realização da soldadura não foram utilizados quaisquer chanfros nos tubos a unir.

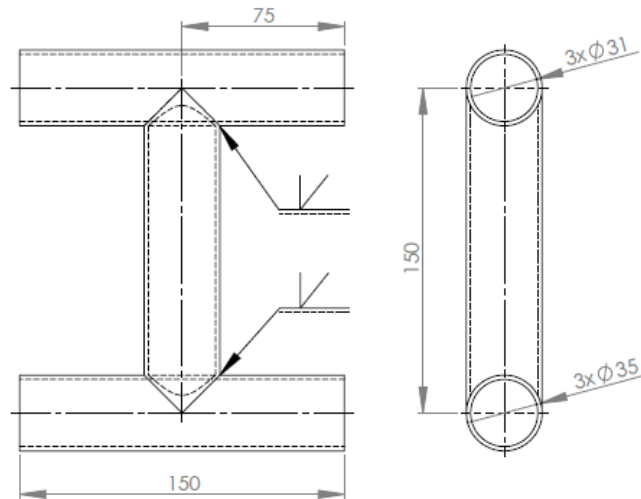


Figura 6.5 - Desenho do provete H [16].

6.2.2. Sistema de Amarração

Na Figura 6.6 encontra-se um exemplo de um provete durante a um ensaio no qual é evidente o deslocamento Z para criar um momento flector segundo a direcção yy.

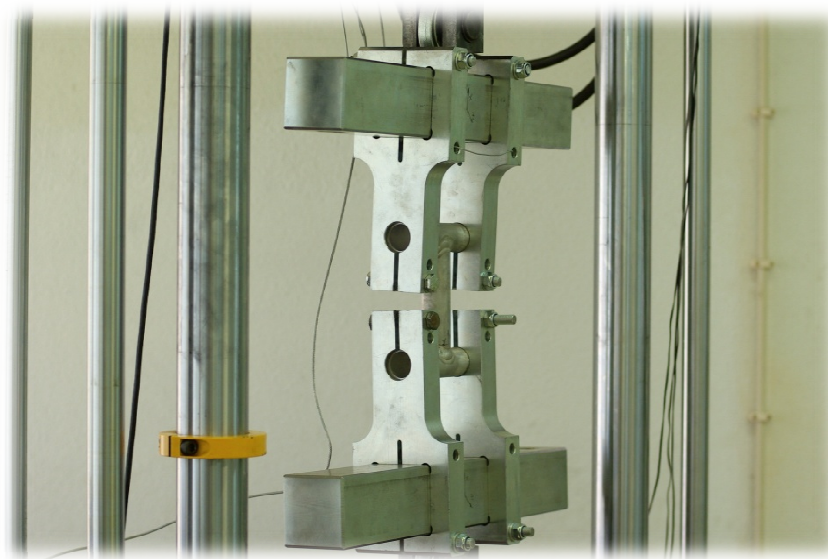


Figura 6.6 - Ensaio de fadiga com provete descentrado.

Para realizar os ensaios de fadiga aos provetes foram construídas amarras (AnexoIII) que permitem atravancar o provete à máquina uniaxial de ensaios de fadiga. As amarras foram concebidas para que seja possível a aplicação de forças normais e ao mesmo tempo momentos flectores proporcionais, tal como foi determinado na análise por elementos finitos feita ao quadro de bicicleta. Os momentos flectores são criados através da força axial, aplicando um descentramento controlado Y e Z, segundo as direcções yy e zz do sistema de eixos representado.

Para montagem do provete no sistema de amarração teve de ser criado um procedimento (Anexo IV) para garantir que o provete estava isento de esforços não desejáveis, tendo em atenção que estes tinham ligeiros empenos devido ao processo de soldadura. A partir do momento em que o provete estava alinhado fazia-se deslocá-lo de uma distância Y e Z para criar os momentos flectores pretendidos.

6.2.3. Ensaio de Fadiga

Com base na análise pelo método dos elementos finitos, foram definidos os esforços a aplicar no provete de modo a que fosse criada uma situação semelhante à da secção crítica do quadro da bicicleta. Uma vez que a máquina de ensaios é do tipo uniaxial não há capacidade para se aplicarem esforços de corte.

A tensão normal aplicada no provete foi obtida de modo a obter um valor equivalente à tensão normal devido à força normal e às tensões de corte devidas a esforços transversos e momento torsor, conforme (6.1).

$$\sigma_{Neq} = \sqrt{\sigma_F^2 + 3(\tau_{Vt}^2 + \tau_{Vs}^2 + \tau_{Tr}^2)} \quad (6.1)$$

em que σ_F representa a tensão devido à força normal F , τ_{Vt} representa a tensão devido ao esforço transversal em Y, τ_{Vs} representa a tensão devido ao esforço transversal em Z e τ_{Tr} representa a tensão devido ao momento torsor.

A força normal a aplicar no provete foi calculada directamente por (6.2).

$$N_{eq} = \sigma_{Neq} \times A_{tubo} \quad (6.2)$$

em que A_{tubo} é a área da secção resistente do tubo do provete.

Para aplicação dos momentos flectores em yy e zz, utilizou-se a carga normal N_p e descentrou-se os provetes na direcção zz e yy respectivamente. Os valores de Y e Z foram calculados para criarem as mesmas tensões devido aos momentos flectores no provete que os observados na secção crítica do quadro da bicicleta, conforme (6.3) e (6.4).

$$Y = \frac{\sigma_{Mz} \times I_{tubo}}{N_p \times r_{tubo}} \quad (6.3)$$

$$Z = \frac{\sigma_{My} \times I_{tubo}}{N_p \times r_{tubo}} \quad (6.4)$$

em que I_{tubo} é o momento de segunda ordem do tubo e r_{tubo} é raio exterior do tubo do provete [19].

Na Tabela 6.1 são apresentados os esforços normais e valores de descentramento a aplicar no provete para a realização de cada um dos respectivos ensaios.

Tabela 6.1 - Esforços para realização de ensaios.

	Ensaio 1.1	Ensaio 1.2	Ensaio 2	Ensaio 3
	Pedalagem 1	Pedalagem 2	Horizontal	Vertical
F_{máx} [KN]	6.71	6.16	3.80	1.92
F_{min} [KN]	0.67	0.62	-1.90	0.19
F_{méd} [KN]	3.69	3.39	0.95	1.06
F_{alt} [KN]	3.02	2.77	2.85	0.86
Y [mm]	-5.75	7.36	-5.77	3.99
Z [mm]	-11.26	4.35	3.31	4.56

Sempre que o ciclo de carga era pulsado, considerou-se o valor de força mínima não nulo mas obtido para uma razão de tensões $R=0.1$, mantendo a força máxima, ou seja, o valor de força mínima calculado por (6.5). Tomou-se esta opção para evitar problemas que poderiam surgir com folgas no sistema de amarração

$$F_{min} = F_{máx} \times R \quad (6.5)$$

em que R é a razão de tensões.

De modo a cumprir o exposto pela norma NF EN 14766 para cada um dos ensaios, (1.1, 1.2, 2 e 3) o provete tem de resistir 50000 ciclos sem fracturar ou apresentar qualquer evidência visual de fissuras. Na Figura 6.7 e Figura 6.8 encontra-se uma representação esquemática da aplicação das forças nos provetes para cada um dos ensaios de modo a permitir uma melhor percepção dos ensaios realizados.

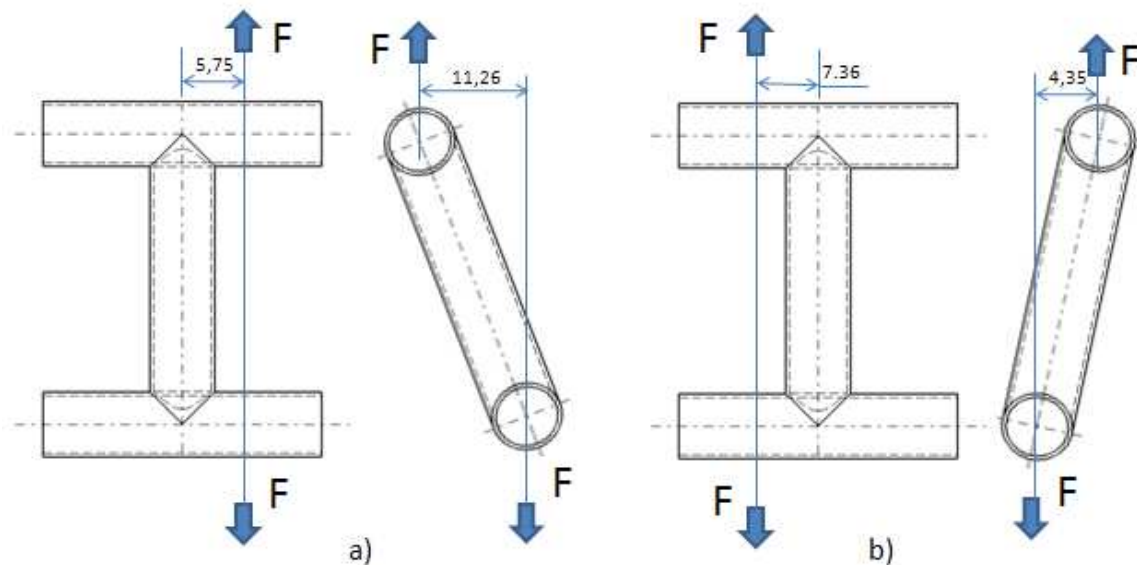


Figura 6.7 - Ensaio de Pedalagem: a) Ensaio 1.1; b) Ensaio 1.2 [16].

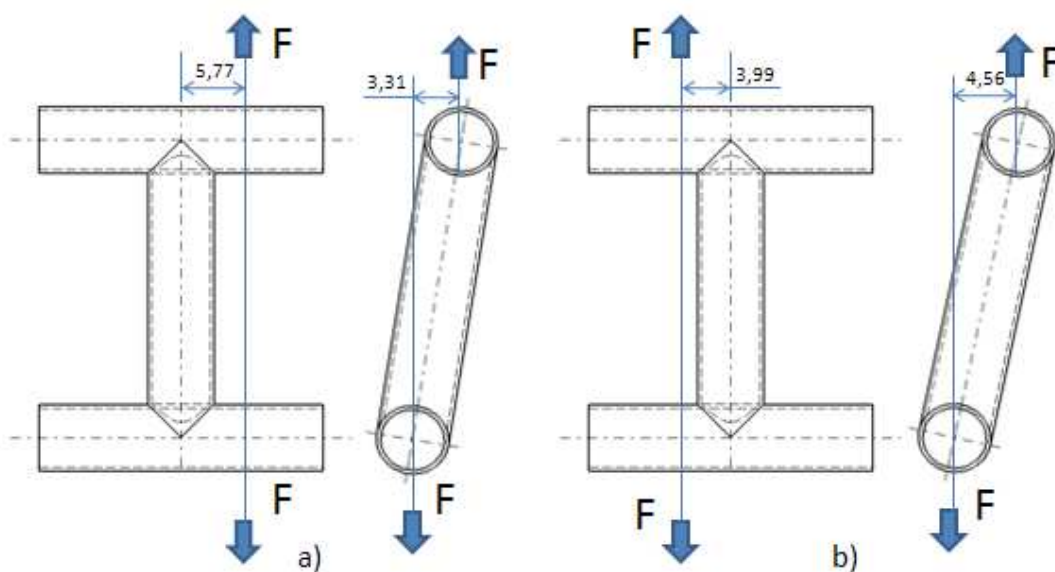


Figura 6.8 - Ensaios de carga vertical a); e horizontal b) [16].

6.2.4. Resultados Obtidos

No total foram disponibilizados 3 provetes devidamente soldados e tratados termicamente para realização de ensaios de fadiga. Devido a não se ter sido compensado o desvio causado pelo empeno do primeiro provete, este acabou por partir ao fim de poucos ciclos, não tendo sido considerado válido. Para os restantes provetes criou-se um procedimento para alinhamento (Anexo III) dos mesmos na máquina de ensaios, eliminando

momentos flectores não desejados devido ao empeno. Para o provete número 2 é apresentado o histórico de carregamento na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Histórico do carregamento do provete número 2.

Data/Hora	Ensaio Nº	Fmax [KN]	Fmin [KN]	Fméd [KN]	Falt [KN]	Freq. [Hz]	y [mm]	z [mm]	Observações
2/7 - 14h32	Ped.1	6.708	0.6708	3.689	3.0186	5	-5.75	-11.26	0 ciclos
2/7 - 17h14	Ped.1	6.708	0.6708	3.689	3.0186	5	-5.75	-11.26	50000 ciclos
2/7 - 17h45	Ped.2	6.159	0.6159	3.3387	2.77	5	7.36	4.35	0 ciclos
2/7 - 19h08	Ped.2	6.159	0.6159	3.3387	2.77	12	7.36	4.35	50000 ciclos
2/7 - 19h15	Horz.	3.796	-1.898	0.949	2.847	2	-5.77	3.31	0 ciclos
2/7 - 19h30	Horz.	3.796	-1.898	0.949	2.847	2	-5.77	3.31	50000 ciclos (várias paragens devido a folgas)
2/7 - 19h45	Vert.	1.92	0.192	1.056	0.864	18	3.99	4.56	0 ciclos
2/7 - 20h44	Vert.	1.92	0.192	1.056	0.864	18	3.99	4.56	50000 ciclos

Durante a desmontagem do provete número 2 da máquina de ensaios foi aplicada acidentalmente uma carga de compressão elevada tendo-o levado à ruptura. Contudo durante o ensaio e após este ter sido realizado inspeccionou-se várias vezes o provete enquanto estava montado na máquina de ensaios, nunca se tendo verificado qualquer fissura por fadiga. Da análise da superfície do provete ao microscópio, após este ter sido sujeito à carga de compressão, não se detectou qualquer evidência de fendas por fadiga. Neste provete não foram utilizados líquidos penetrantes, pois a rotura acidental a que este foi sujeito não permitiria uma correcta análise por este método de detecção de fendas.

Para o provete número 3 é apresentado o histórico de carregamento na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Histórico do carregamento do provete número 3.

Data/Hora	Ensaio Nº	Fmax [KN]	Fmin [KN]	Fméd [KN]	Falt [KN]	Freq. [Hz]	y [mm]	z [mm]	Observações
6/7 - 11h09	Ped.1	6.708	0.6708	3.689	3.0186	5	-5.75	-11.26	0 ciclos
6/7 - 14h00	Ped.1	6.708	0.6708	3.689	3.0186	5	-5.75	-11.26	50000 ciclos
6/7 - 15h32	Ped.2	6.159	0.6159	3.3387	2.77	5	7.36	4.35	0 ciclos
6/7 - 20h50	Ped.2	6.159	0.6159	3.3387	2.77	5	7.36	4.35	157070 ciclos

No caso do provete 3 este foi apenas sujeito a dois tipos de carregamento. O primeiro carregamento representa o primeiro ensaio de pedalagem (Ensaio 1.1). No segundo carregamento que representa o segundo ensaio de pedalagem (Ensaio 1.2), foram realizados cerca de 150000 ciclos em vez dos 50000 ciclos a que corresponde este ensaio. Tal aconteceu por se ter optado por realizar o número de ciclos correspondente aos restantes ensaios utilizando este mesmo carregamento. Em termos de esforços aplicados pode-se afirmar que o ensaio 1.2 é mais severo do que os ensaios 2 e 3, garantindo assim uma correcta avaliação do comportamento do provete.

Após ensaio, o provete número 3 foi sujeito a uma inspecção visual e foram utilizados líquidos penetrantes para detectar eventuais fissuras. Da inspecção visual feita a olho e num microscópio de baixa ampliação não foi detectada qualquer fissura.

De modo a garantir que os provetes não tinham fissuras que não fossem detectadas a olho nu, foi utilizado líquidos penetrantes para uma análise mais rigorosa. Na Figura 6.9 e Figura 6.10 encontram-se respectivamente os líquidos penetrantes utilizados e os provetes após a sua aplicação.



Figura 6.9 - Líquidos penetrantes utilizados.



Figura 6.10 - Provetes após a aplicação dos líquidos penetrantes.

Apesar de não terem sido detectadas quaisquer tipos de fissuras nos provetes, há a assinalar a detecção de alguma porosidade na zona onde se deu o fecho do cordão do provete número 3. Esta porosidade não foi originada pelos ensaios de fadiga, mas sim pelo próprio processo de soldadura. A porosidade encontra-se representada na Figura 6.11.



Figura 6.11 - Porosidades na soldadura do provete 3.

6.2.5. Análise Metalográfica

Foi realizada alguns provetes de teste que não foram sujeitos a ensaios de fadiga, uma análise metalográfica com o objectivo de verificar a existência de defeitos na soldadura. Foram obtidas amostras da soldadura através de cortes perpendiculares às direcções da soldadura. Estas amostras foram posteriormente sujeitas a operações de polimento com lixas de carboneto de silício com granulometrias desde os 300 até 2000 mesh. Após o polimento, de modo a ser possível uma observação das amostras no microscópio metalográfico as amostras tiveram de ser sujeitas a uma contrastação que se trata de um ataque químico feito à superfície previamente polida na qual são realçadas as suas imperfeições. O agente químico utilizado para a realização da contrastação foi uma mistura de ácido nítrico (HNO_3) e de água na proporção de 25:75 respectivamente [5], encontrando-se o procedimento de preparação do reagente químico em anexo (ANEXO V).

As amostras foram posteriormente observadas ao microscópio que neste caso se tratou de um microscópio metalográfico equipado com uma câmara de aquisição de imagem que permite a aquisição de imagem num computador. O microscópio utilizado trata-se de um microscópio Olympus BHM que se encontra na Figura 6.12.

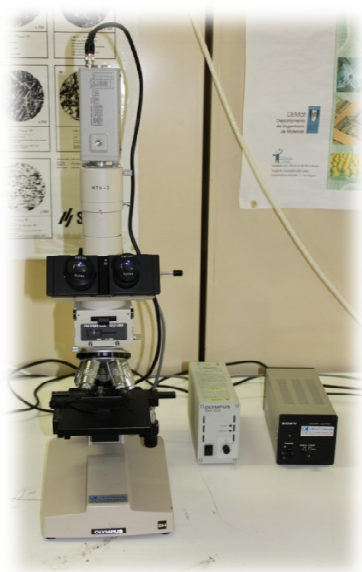
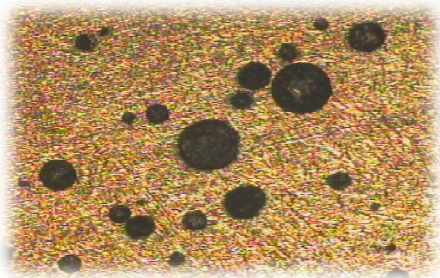
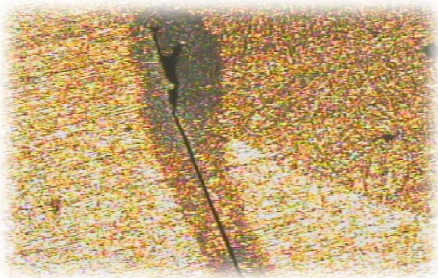
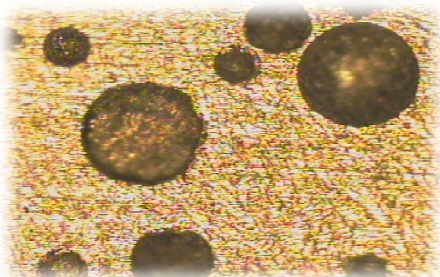
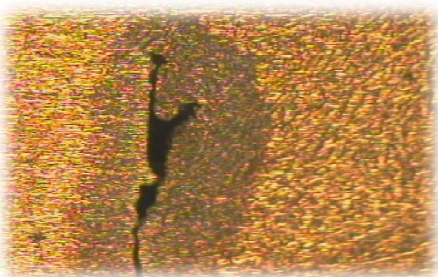
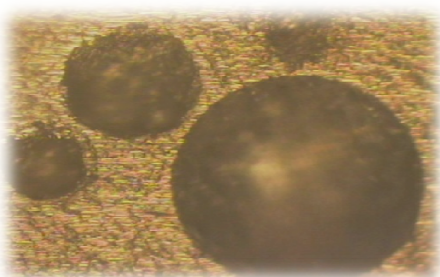
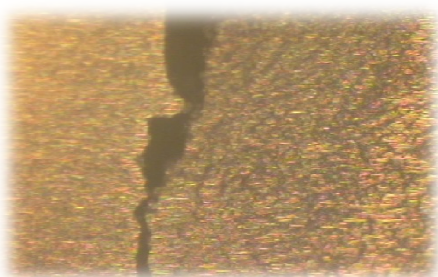


Figura 6.12 - Microscópio metalográfico.

O microscópio utilizado possui um poder de ampliação de 800x, no entanto o máximo utilizado para a observação de defeitos foi de 200x, pois para ampliações superiores, os defeitos já se tornam demasiado grandes, não permitindo assim uma correcta observação. Foi possível observar alguns defeitos, como por exemplo fissuras e porosidades que se encontram identificadas na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Exemplos de amostras observadas ao microscópio.

Ampliação	Porosidades	Fendas
50x		
100x		
200x		

Foi também realizada uma observação a outras amostras provenientes de provetes ainda em fase de ajuste dos parâmetros da soldadura. Nestas amostras foi possível observar alguns defeitos como porosidades que se encontravam ainda em grande quantidade. Para estas observações as amostras foram apenas sujeitas a um polimento com uma lixa de 300mesh, não tendo sido sujeitas a qualquer tipo de contrastação. A observação das amostras foi realizada com uma lupa binocular Leica Zoom 2000 (Figura 6.13) que permite uma ampliação máxima de 30x.



Figura 6.13 - Lupa binocular.

Das amostras que foram observadas com a lupa binocular encontram-se dois exemplos na Figura 6.14, um de uma soldadura com porosidade e outro de uma soldadura com uma fenda.

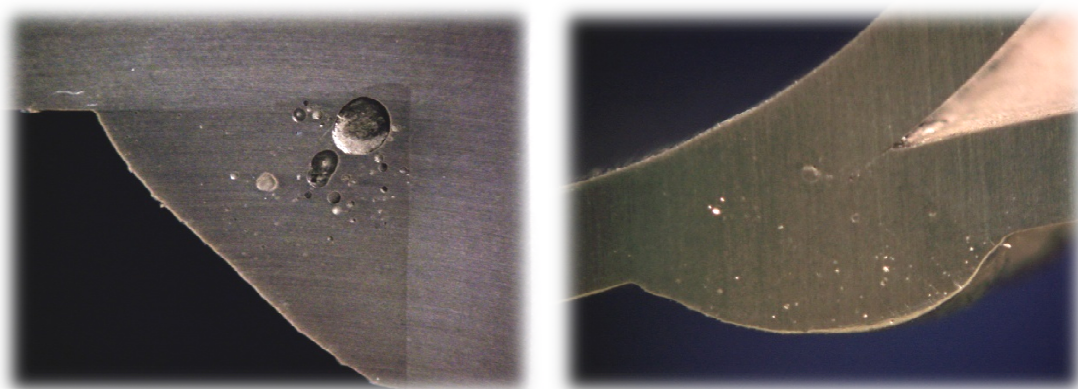


Figura 6.14 - Defeitos de soldadura.

Capítulo 7

Conclusões

A metodologia descrita neste trabalho tem como principal função a redução de custos, tempo e recursos na aprovação do procedimento para o fabrico do quadro da bicicleta tendo como referência a norma NF14766. Para tal os ensaios realizados nos provetes tipo H tiveram em conta os esforços aplicados no quadro para cada um dos ensaios, o que retrata uma situação de ensaio do quadro inteiro.

Através da utilização desta metodologia, não foi necessária a construção do quadro para o seu posterior ensaio. Deste modo conseguiu-se reduzir significativamente os custos associados à produção de quadros para a realização de ensaios. Pois no caso dos provetes testados, estes apenas possuem duas soldaduras (iguais) enquanto que no caso do quadro, este possui cerca de 15 soldaduras, necessitando cada uma delas de um elevado tempo de setup e de programação. Todo o processo de soldadura é automatizado através da utilização de braços robotizados, o que obriga a disponibilizar de mão-de-obra especializada e a um maior gasto de tempo por cada soldadura que se tenha de alterar parâmetros.

Tendo em conta a quantidade de soldaduras do quadro apresentando cada uma delas uma geometria distinta, pode-se afirmar que esta metodologia permitiu reduzir cerca de 15 vezes os custos de produção, bem como os tempos de setup e de produção do quadro. Pois é bastante mais viável a produção de vários provetes para a realização de testes do que de quadros de bicicleta que implicariam a utilização de mais braços robotizados.

Apesar de se terem validado os provetes com a realização dos ensaios, tal não garante que os quadros não tenham de sofrer posteriormente os ensaios de forma validar a sua conformidade com a norma anteriormente referenciada. No entanto os ensaios a realizar aos quadros não terão de ser tão exaustivos, uma vez que os parâmetros inerentes ao processo de soldadura foram já previamente definidos e otimizados com a realização dos ensaios aos provetes H.

Relativamente a trabalhos futuros estes poderiam passar por submeter o quadro da bicicleta estudado a todos os ensaios definidos pela norma NF EN14766, bem como uma análise local a cada um dos cordões de soldadura do quadro da bicicleta para assim obter uma análise mais detalhada. Outro aspecto que também seria relevante era a realização de uma previsão de empenos e distorções que surgem no quadro resultantes do processo de soldadura, bem como metodologias para o seu desempenho.

Bibliografia

- [1] - Soldadura MIG, <http://www.weldguru.com/Mig.html>, consultado em 15/10/2009 [4]
- [2] - Wainer Emílio, Brandi Sérgio Duarte, Homem de Mello Fábio Decourt, "Soldagem – Processos e Metalurgia", Editora Edgard Blucher Ltda, 1ª Edição, 1992.
- [3] - Soldadura MIG,
http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=metal_inert_gas_welding_mig_gmaw, consultado em 15 de Outubro de 2009.
- [4] - American Welding Society, "Welding Handbook – Vol.1 Welding Technology", Eighth Edition 1996, ISBN:0-87171-281-4.
- [5] - American Welding Society, "Welding Handbook – Vol.3 Materials and Applications Part 1", Eighth Edition 1996, ISBN:0-87171-470-1.
- [6] - Sacks & Bohnart, "Welding Principles and Practices", McGraw Hill, 3rd Edition, 2005, ISBN: 0-07-825060-9.
- [7] - Soldadura MIG, http://pt.wikipedia.org/wiki/Soldagem_MIG/MAG, consultado em 12 de Outubro de 2009.
- [8] - Tipos de Juntas Soldadas,
http://3.bp.blogspot.com/_YUOA9Y0P6_E/R9rUACGOtal/AAAAAAAAABY/uB3a36yohtU/s1600-h/juntas_chanfros-756441.bmp, consultado em 19 de Outubro de 2009.
- [9] - R.R. Ambriz, G.Barrera, V.H. López, A comparative study of the mechanical properties of 6061-T6 GMA welds obtained by the indirect electric arc (IEA) and the modified indirect electric arc (MIEA), Materials and Design 2009; 30:2446-2453.
- [10] - American Society of Materials, "ASM Handbook – Vol.4 Metallography and Microstructures", International Handbook Committee, 1994, ISBN: 0-87170-015-8.
- [11] - Online Material Information Resource", www.matweb.com, consultado em 20/06/2009.
- [12] - Engineering Fundamentals", www.efunda.com, consultado em 20/06/2009
- [13] - Arlindo Silva, João Dias, Luís Sousa, "Desenho Técnico Moderno", Lidel, 3ª Edição, 2002, ISBN: 972-757-260-X.
- [14] - C.Menzemer, P.C. Lam, T.S. Srivatsan, C.F. Wittel, An investigation of fusion zone microstructures of welded aluminium alloy joints, Materials Letters 1999; 41: 192-197.
- [15] - Smith F. William, "Principios de Ciência e Engenharia dos Materiais", McGrawHill, 3ª Edição, 1998, ISBN:972-8298-68-4.

- [16] - P.Machado, R.A.Cláudio, A.Valido, R.Duarte, O.Martins, Pre-Validation of welded joints in a bike frame, Conferência Ibérica de Fractura e Integridade Estrutural 2010; 133:138
- [17] - Woei-Shyan Lee, Jia-Chyuan Shyu, Su-Tang Chiou, Effect of Strain Rate on Impact Response and Dislocation Substructure of 6161-T6 Aluminium Alloy, Scripta Mater. 42 (2000), 51-56.
- [18] - Welding Design, <http://isadikin.wordpress.com/2006/08/27/weld-defects/>, consultado em 15 Janeiro de 2010.
- [19] - Carlos A. G. de Moura Branco, A. Augusto Fernandes, Paulo M. S. Tavares de Castro, "Fadiga de Estruturas Soldadas", Fundação Calouste Gulbenkian, 1ª Edição – Agosto 1986.
- [20] – "ASM Handbook - Vol.9 Metallography and Microstructures", International Handbook Committee, ASM International 1994, ISBN: 0-87170-015-8.
- [21] - Welding crack, http://2.bp.blogspot.com/_2_Qj1bCWctU/SrQ5-cVC_Cl/AAAAAAAAAV4/7CGUrs5uv_s/s400/crack2.jpg, consultado em 15 de Janeiro de 2010.
- [22] - Structural welding integrity, <http://www.volpe.dot.gov/>, consultado em 9 Abril 2010 [12]
- [23] - Welding defect, <http://allshops.org/community/CommunityAlbum/9980173662863.jpg>, consultado em 15 de Janeiro de 2010.
- [24] - Welding defects", <http://www.exponent.com/Oil-and-Gas-Process-Piping-Construction-Arbitration/>, consultado em 5 de Março de 2010.
- [25] - Defects/imperfections in welds, <http://images.google.pt/imgres?imgurl=http://www.twi.co.uk/twimages/jk43f3.jpg>, consultado em 15 Janeiro de 2010.
- [26] - Carlos A. G. de Moura Branco, "Mecânica dos Materiais", Fundação Calouste Gulbenkian, 4ª Edição, 2006, ISBN: 972-31-1147-0.
- [27] - Fenómeno da Fadiga, http://www.google.pt/url?sa=t&source=web&ct=res&cd=8&url=http%3A%2F%2Fwww.exatec.unisinos.br%2F~fortis%2Farquivos%2FAula_11_-_Fadiga_dos_materiais.doc&ei=vYa_SvwwNZSNjAew6d0a&rct=j&q=fenomeno+de+fadiga+de+materiais&usg=AFQjCNGjmoLDJf9Qu8Yfy6GloiZSvxHgQ&sig2=JRJLcVOCQ2AQb-TQGIDIkA, consultado em 27/09/2009.
- [28] - Stress-Life Fatigue Analysis, http://www.engrasp.com/doc/etb/mod/fm1/stresslife/stresslife_help.html, consultado em 6 de Outubro de 2010.

- [29] - Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke, "Mechanical Engineering Design", McGrawHill 6ªEdição.
- [30] - Halil Demir, Suleyman Gunduz, The effects of aging on machinability of 6061 aluminium alloy, Materials and Designs 2009, 30:1480-1483.
- [31] - Pipeline, <http://risingtide.org.uk/bristol/pipeline>, consultado em 30/04/2010.
- [32] - Amtec Consultants, <http://www.amteccorrosion.co.uk/corrosion%20resistant%20ship.html>, consultado em 30 de Abril de 2010.
- [33] - Corrosion, <http://www.rapid-response-consulting.com/>, consultado em 30 de Abril de 2010
- [34] - Norma NF EN 14766, AFNOR - Association Française de Normalisation, 2006.

Anexo I

Propriedades da Liga Al 6061-T6

Tabela A.1 - Propriedades da liga Al 6061-T6 [12].

Aluminum 6061-T6; 6061-T651

Categories: [Metal](#); [Nonferrous Metal](#); [Aluminum Alloy](#); [6000 Series Aluminum Alloy](#)

Material Notes: Information provided by Alcoa, Starmet and the references. General 6061 characteristics and uses: Excellent joining characteristics, good acceptance of applied coatings. Combines relatively high strength, good workability, and high resistance to corrosion; widely available. The T8 and T9 tempers offer better chipping characteristics over the T6 temper.

Applications: Aircraft fittings, camera lens mounts, couplings, marines fittings and hardware, electrical fittings and connectors, decorative or misc. hardware, hinge pins, magneto parts, brake pistons, hydraulic pistons, appliance fittings, valves and valve parts; bike frames.

Data points with the AA note have been provided by the Aluminum Association, Inc. and are NOT FOR DESIGN.

Composition Notes:
Composition information provided by the Aluminum Association and is not for design.

Key Words: al6061, UNS A96061; ISO AlMg1SiCu; Aluminium 6061-T6, AD-33 (Russia); AA6061-T6; 6061T6, UNS A96061; ISO AlMg1SiCu; Aluminium 6061-T651, AD-33 (Russia); AA6061-T651

Vendors: [Click here to view all available suppliers for this material.](#)

Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	2.70 g/cc	0.0975 lb/in ³	AA; Typical
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	95	95	AA; Typical; 500 g load; 10 mm ball
Hardness, Knoop	120	120	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell A	40	40	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell B	60	60	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Vickers	107	107	Converted from Brinell Hardness Value
Ultimate Tensile Strength	310 MPa	45.0 ksi	AA; Typical
Tensile Yield Strength	276 MPa	40.0 ksi	AA; Typical
Elongation at Break	12.0 %	12.0 %	AA; Typical; 1/16 in. (1.6 mm) Thickness
	17.0 %	17.0 %	AA; Typical; 1/2 in. (12.7 mm) Diameter
Modulus of Elasticity	68.9 GPa	10000 ksi	AA; Typical; Average of tension and compression. Compression modulus is about 2% greater than tensile modulus.
Notched Tensile Strength	324 MPa	47000 psi	2.5 cm width x 0.16 cm thick side-notched specimen, K _t = 17.
Ultimate Bearing Strength	607 MPa	88000 psi	Edge distance/pin diameter = 2.0
Bearing Yield Strength	386 MPa	56000 psi	Edge distance/pin diameter = 2.0
Poissons Ratio	0.330	0.330	Estimated from trends in similar Al alloys.
Fatigue Strength	96.5 MPa @# of Cycles 5.00e+8	14000 psi @# of Cycles 5.00e+8	completely reversed stress; RR Moore machine/specimen
Fracture Toughness	29.0 MPa-m ^{1/2}	26.4 ksi-in ^{1/2}	K _{IC} ; TL orientation.
Machinability	50 %	50 %	0-100 Scale of Aluminum Alloys
Shear Modulus	26.0 GPa	3770 ksi	Estimated from similar Al alloys.
Shear Strength	207 MPa	30000 psi	AA; Typical
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.00000399 ohm-cm	0.00000399 ohm-cm	AA; Typical at 68 °F
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	23.6 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 100 °C	13.1 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 212 °F	AA; Typical; average over range
	25.2 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 300 °C	14.0 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 572 °F	
Specific Heat Capacity	0.896 J/g-°C	0.214 BTU/lb-°F	
Thermal Conductivity	167 W/m-K	1160 BTU-in/hr-ft ² -°F	AA; Typical at 77 °F
Melting Point	582 - 651.7 °C	1080 - 1205 °F	AA; Typical range based on typical composition for wrought products 1/4 inch thickness or greater; Eutectic melting can be completely eliminated by homogenization.
Solidus	582 °C	1080 °F	AA; Typical
Liquidus	651.7 °C	1205 °F	AA; Typical
Processing Properties	Metric	English	Comments
Solution Temperature	529 °C	985 °F	
Aging Temperature	160 °C	320 °F	Rolled or drawn products; hold at temperature for 18 hr
	177 °C	350 °F	Extrusions or forgings; hold at temperature for 8 hr
Material Components Properties	Metric	English	Comments
Aluminum, Al	95.8 - 98.6 %	95.8 - 98.6 %	As remainder
Chromium, Cr	0.040 - 0.35 %	0.040 - 0.35 %	

Copper, Cu	0.15 - 0.40 %	0.15 - 0.40 %
Iron, Fe	<= 0.70 %	<= 0.70 %
Magnesium, Mg	0.80 - 1.20 %	0.80 - 1.20 %
Manganese, Mn	<= 0.15 %	<= 0.15 %
Other, each	<= 0.050 %	<= 0.050 %
Other, total	<= 0.15 %	<= 0.15 %
Silicon, Si	0.40 - 0.80 %	0.40 - 0.80 %
Titanium, Ti	<= 0.15 %	<= 0.15 %
Zinc, Zn	<= 0.25 %	<= 0.25 %

[References](#) for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's disclaimer and terms of use regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

Tabela A.2 - Propriedades da liga Al 6061-T6 [12].

Alclad Aluminum 6061-T6, T651

Categories: [Metals](#); [Nonferrous Metal](#); [Aluminum Alloy](#); [6000 Series Aluminum Alloy](#)

Material Notes: DATA POINTS WITH THE AA NOTE HAVE BEEN PROVIDED BY THE ALUMINUM ASSOCIATION, INC. AND ARE NOT FOR DESIGN.

Composition Notes: COMPOSITION FOR AA 6061 (NOT ALCLAD 6061 SPECIFICALLY).
COMPOSITION INFORMATION PROVIDED BY THE ALUMINUM ASSOCIATION AND IS NOT FOR DESIGN.

Key Words: AL6061, ALCLAD 6061-T6, T651; ALCLAD 6061-T6, T651

Vendors: [Click here to view all available suppliers for this material.](#)

PLEASE [CLICK HERE](#) IF YOU ARE A SUPPLIER AND WOULD LIKE INFORMATION ON HOW TO ADD YOUR LISTING TO THIS MATERIAL

Physical Properties	Metric	English	Comments
DENSITY	2.70 g/cc	0.0975 lb/in ³	FOR AA 6061 (NOT ALCLAD)
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
ULTIMATE TENSILE STRENGTH	290 MPA	42.0 KSI	AA; TYPICAL
TENSILE YIELD STRENGTH	255 MPA	37.0 KSI	AA; TYPICAL
ELONGATION AT BREAK	12.0 %	12.0 %	AA; TYPICAL; 1/16 IN. (1.6 MM) THICKNESS
MODULUS OF ELASTICITY	68.9 GPa	10000 KSI	AA; TYPICAL; AVERAGE OF TENSION AND COMPRESSION. COMPRESSION MODULUS IS ABOUT 2% GREATER THAN TENSILE MODULUS.
SHEAR STRENGTH	186 MPA	27000 PSI	AA; TYPICAL
Processing Properties	Metric	English	Comments
SOLUTION TEMPERATURE	529 °C	985 °F	
AGING TEMPERATURE	160 °C	320 °F	ROLLED OR DRAWN PRODUCTS; HOLD AT TEMPERATURE FOR 18 HR
	177 °C	350 °F	EXTRUSIONS OR FORGINGS; HOLD AT TEMPERATURE FOR 8 HR
Material Components Properties	Metric	English	Comments
ALUMINUM, AL	95.8 - 98.6 %	95.8 - 98.6 %	AS REMAINDER
CHROMIUM, CR	0.040 - 0.35 %	0.040 - 0.35 %	
COPPER, CU	0.15 - 0.40 %	0.15 - 0.40 %	
IRON, FE	<= 0.70 %	<= 0.70 %	
MAGNESIUM, MG	0.80 - 1.20 %	0.80 - 1.20 %	
MANGANESE, MN	<= 0.15 %	<= 0.15 %	
OTHER EACH	<= 0.050 %	<= 0.050 %	
OTHER TOTAL	<= 0.15 %	<= 0.15 %	
SILICON, SI	0.40 - 0.80 %	0.40 - 0.80 %	
TITANIUM, TI	<= 0.15 %	<= 0.15 %	
ZINC, ZN	<= 0.25 %	<= 0.25 %	

References

FOR THIS DATASHEET:

SOME OF THE VALUES DISPLAYED ABOVE MAY HAVE BEEN CONVERTED FROM THEIR ORIGINAL UNITS AND/OR ROUNDED IN ORDER TO DISPLAY THE INFORMATION IN A CONSISTENT FORM AT USERS REQUIRING MORE PRECISE DATA FOR SCIENTIFIC OR ENGINEERING CALCULATIONS CAN CLICK ON THE PROPERTY VALUE TO SEE THE ORIGINAL VALUE AS WELL AS RAW CONVERSIONS TO EQUIVALENT UNITS. WE ADVISE THAT YOU ONLY USE THE ORIGINAL VALUE OR ONE OF ITS RAW CONVERSIONS IN YOUR CALCULATIONS TO MINIMIZE ROUNDING ERROR. WE ALSO ASK THAT YOU REFER TO MATWEB'S DISCLAIMER AND TERMS OF USE REGARDING THIS INFORMATION. [Click here](#) TO VIEW ALL THE PROPERTY VALUES FOR THIS DATASHEET AS THEY WERE ORIGINALLY ENTERED INTO MATWEB.

Anexo II

Verificação do Comportamento do Elemento Finito Beam 3d de Secção Variável

A viga representada na Figura A.1 foi analisada no programa CosmosM utilizando o elemento finito de viga beam 3d de secção variável, e os resultados obtidos comparados com a solução analítica.

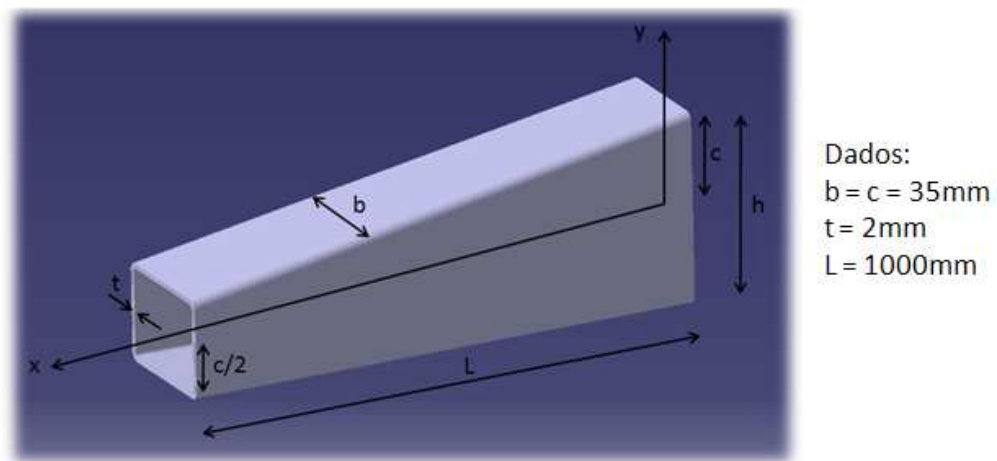


Figura A.1 - Viga de secção variável.

Considerando-se um modelo de uma viga encastrada/livre sujeita a uma força vertical aplicada na extremidade livre (Figura A.2). A extremidade encastrada é aquela cuja secção tem altura $h=2c$.

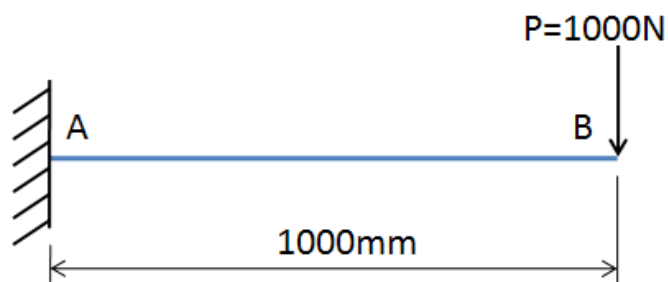


Figura A.2 - Modelo da viga encastrada/livre sujeita a uma força na extremidade livre.

Nas Tabela A.3 e Tabela A.4, encontram-se as propriedades das secções inicial e final da viga respectivamente. Considerou-se que a altura da secção varia linearmente ao longo da viga.

Tabela A.3 - Propriedades da secção inicial da viga.

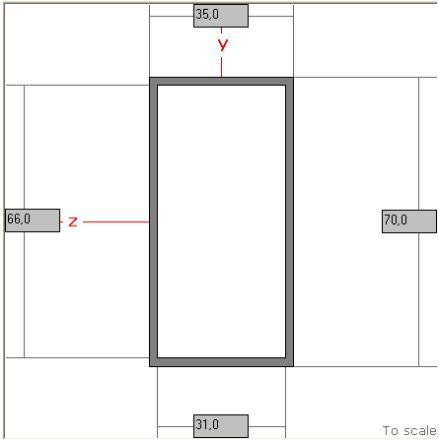
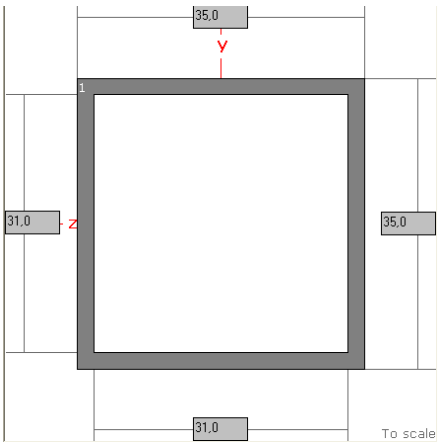
Secção Inicial		
	Momento de Inércia I_y [m ⁴]	Momento de Inércia I_z [m ⁴]
	86253,67x10 ⁻¹²	257718,67x10 ⁻¹²
	Área [m ²]	
	4,04x10 ⁻⁴	

Tabela A.4 - Propriedades da secção final da viga.

Secção Final		
	Momento de Inércia I_y [m ⁴]	Momento de Inércia I_z [m ⁴]
	48092x10 ⁻¹²	48092x10 ⁻¹²
	Área [m ²]	
	2,64x10 ⁻⁴	

Solução Analítica

Foram calculadas as reacções no encastramento e o deslocamento na extremidade livre. Na Figura A.3 está representado o diagrama de corpo livre da viga bem como o valor das reacções.

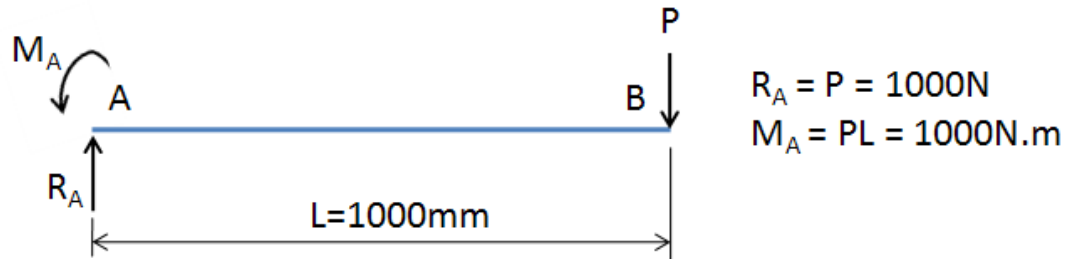


Figura A.3 - Diagrama de corpo livre.

De acordo com a Figura A.4 temos que o momento flector ao longo da viga é dado por:

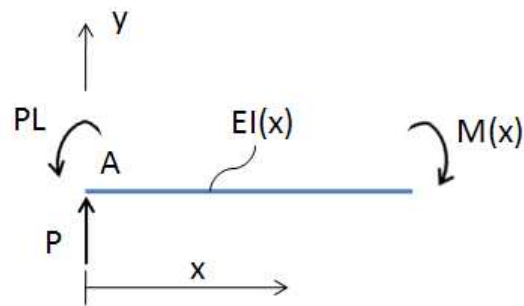


Figura A.4 - Esforços presentes na viga.

$$M(x) = -PL + Px \quad (\text{A.1})$$

Sabendo que:

$$\frac{d^2y(x)}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI(x)} \quad (\text{A.2})$$

Temos:

$$E \frac{dy(x)}{dx} = \int_0^x \frac{M(x)}{I(x)} dx + c1 \quad (\text{A.3})$$

$$E \frac{dy(x)}{dx} = \int_0^x \int_0^x \frac{M(x)}{I(x)} dx dx + c1x + c2 \quad (\text{A.4})$$

As constantes c_1 e c_2 são calculadas através das condições de fronteira:

$$x = 0 \Rightarrow y = 0 \rightarrow c_2 = 0$$

$$x = 0 \Rightarrow \frac{dy}{dx} = 0 \rightarrow c_1 = 0$$

Assim:

$$Ey(x) \frac{dy(x)}{dx} = \int_0^x \int_0^x \frac{M(x)}{I(x)} dx dx \quad (A.5)$$

Como a secção é variável, o seu segundo momento de área é também uma função de x , dada por:

$$I(x) = \frac{b \times h(x)^3 [(b - 2t) \times (h(x) - 2t)^3]}{12}$$

Em que:

$$h(x) = 2c - \frac{2c}{L}x = 2c - \frac{cx}{L} \quad (A.6)$$

Considerando $c = 35\text{mm}$ e $t = 2\text{mm}$ obtém-se:

$$I(x) = \frac{35h(x)^3}{12} - \frac{(35 - 2 \times 2)[h(x) - 2 \times 2]^3}{12} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow I(x) = 2,92h(x)^3 - 2,58[h(x) - 4]^3 \quad (A.7)$$

Substituindo em (A.1), (A.6) e (A.7) na equação (A.5) temos:

$$Ey(x) = \int_0^x \int_0^x \frac{-1000 + 1000(x)}{2,92h(x)^3 - 2,58[h(x) - 4]^3} dx dx$$

$$Ey(x) = \int_0^x \int_0^x \frac{-1000 + 1000(x)}{2,92\left(2c - \frac{cx}{L}\right)^3 - 2,58\left[\left(2c - \frac{cx}{L}\right) - 4\right]^3} dx dx$$

Substituindo os valores de c e de L e recorrendo ao programa Mapple V9.5, para a realização do integral, obtém-se:

$$y(x = 1000) \equiv y_B = 20,71\text{mm}$$

que é o valor do deslocamento na extremidade livre da viga.

Modelo de elementos finitos

Na Figura A.5 está representado o modelo de elementos finitos criado no programa CosmosM. Foram utilizados elementos finitos de viga 3d (Beam 3d) de secção variável e consideradas as propriedades das secções calculadas anteriormente. Afim de estudar uma possível influência do número de elementos, consideraram-se três discretizações, uma com um elemento, outra com dez elementos e outra com cem elementos.

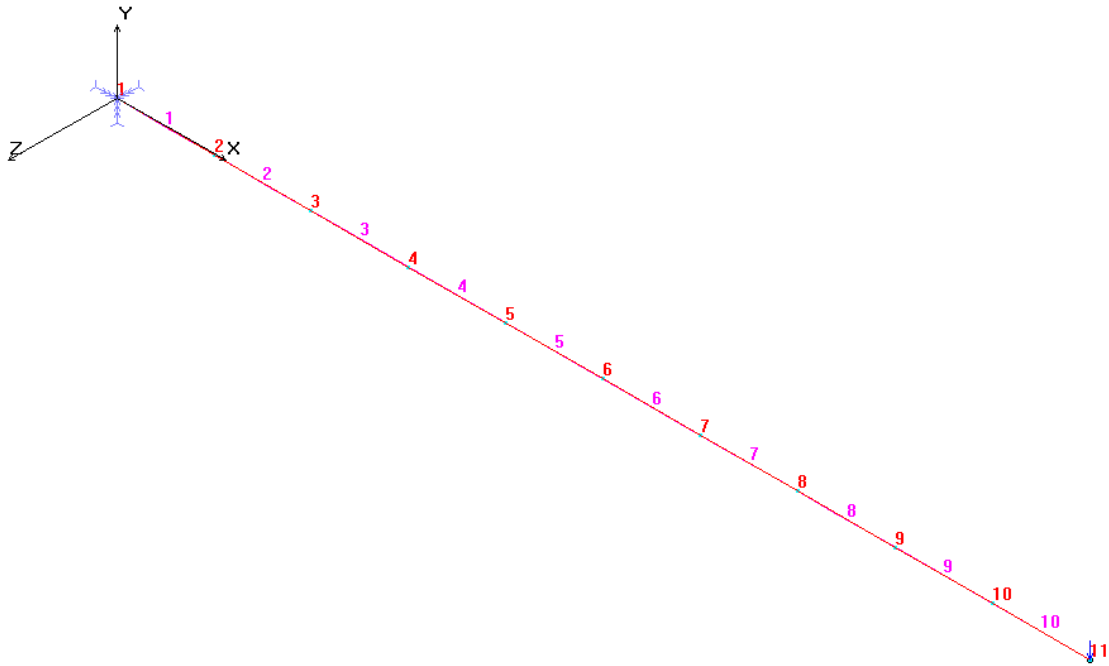


Figura A.5 - Modelo de elementos finitos, discretização com 10 elementos.

Tabela A.5 - Resultados do modelo de elementos finitos.

Nº de Elementos	y_B [mm] Modelo elementos finitos	y_B [mm] Teórico	Erro relativo [%]
1	21,03	20,71	1,5
10	21,03		
100	21,03		

Conclui-se assim que os resultados obtidos (Tabela A.5) para este exemplo são independentes da discretização e que o erro relativamente ao valor teórico é muito pequeno, podendo afirmar que se trata de um modelo aproximado da realidade.

Anexo III

Procedimento de Colocação do Provete na Máquina

Este documento de anexo tem como função descrever todo o processo de montagem dos provetes H utilizados com o sistema de amarras desenvolvido para a realização dos ensaios de fadiga.

Constituintes do Sistema de Amarras:

O Sistema de Amarras utilizado é constituído por vários componentes, estando estes identificados na Figura A.6 e Figura A.7, bem como na Tabela A.6.

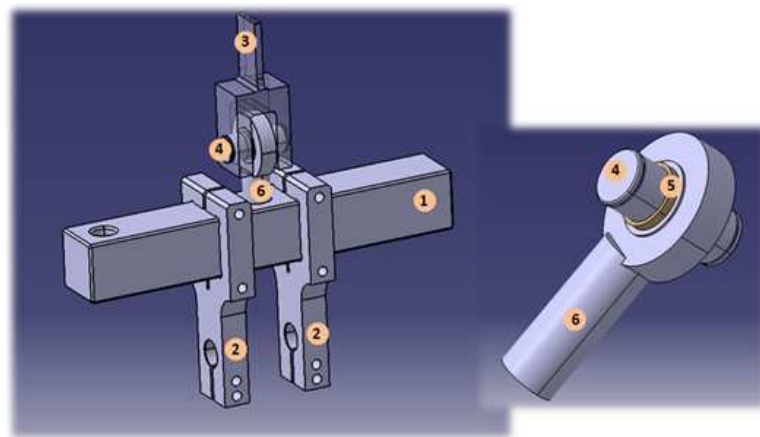


Figura A.6- Sistema de amarras.

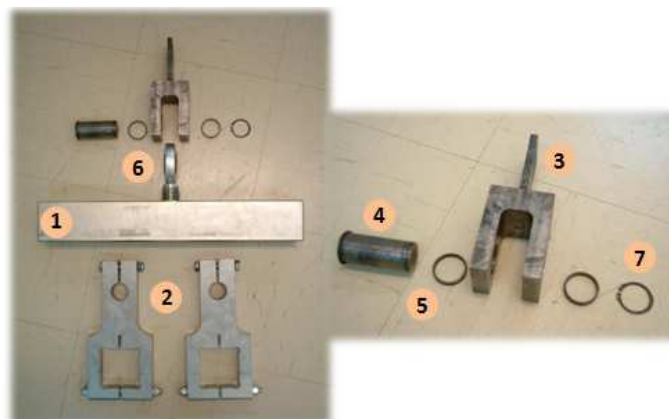


Figura A.7 - Constituintes do sistema de amarras.

Tabela A.6 - Constituintes do sistema de amarras.

Legenda Figuras 1 e 2		
Nº	Designação	Qtd.
1	Amarra	2
2	Suporte Provete	4
3	Acoplamento Máquina	2
4	Pino	2
5	Anel Espaçador	2
6	Rótula M 36	4
7	Freio	4

- Colocação das amarras superior e inferior na máquina

As amarras para a realização do ensaio são colocadas nas amarras da máquina, sendo estas fixas através do próprio mecanismo hidráulico das amarras da máquina.



Figura A.8 - Colocação das amarras superior e inferior na máquina.

- Montagem dos suportes do provete nas amarras

Os suportes dos provetes são colocados nas amarras sem qualquer ordem específica, tendo apenas em atenção que estes se devem encontrar folgados para se conseguir fazer a sua montagem.

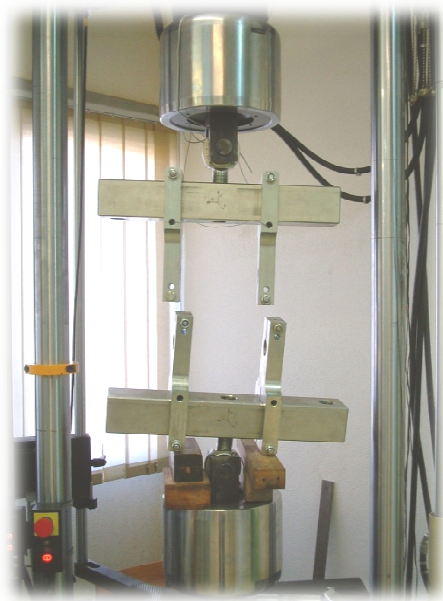


Figura A.9 - Montagem dos suportes do provete nas amarras.

- Colocação do provete nos suportes

Para a colocação do provete nos suportes, estes encontram-se livres, podendo ajustar-se à posição mais conveniente para a montagem dos provetes.

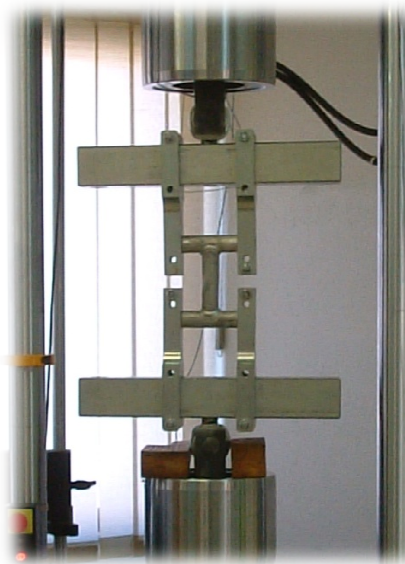


Figura A. 10 - Colocação do provete nos suportes.

- Alinhamento do provete com o eixo de aplicação de força axial da máquina

De modo a garantir o alinhamento do tubo vertical dos provetes com o eixo de aplicação de força da máquina, foram utilizados dois comparadores e dois suportes magnéticos (Figura A.11) como se pode observar na Figura A.12. Este alinhamento é feito aplicando uma pequena carga axial no provete, o que leva a que haja deslocamento vertical das amarras, deslocamento esse que é medido pelos comparadores. Através desta medição pode-se assim comparar os valores de deslocamento e caso estes sejam iguais garante-se um perfeito alinhamento do provete com a máquina. De modo a ajustar os deslocamentos registados pelos comparadores, vai-se variando a posição das amarras no eixo dos y até que estes apresentem o mesmo valor.



Figura A.11 - Montagem dos comparadores com os suportes magnéticos.



Figura A.12 - Alinhamento do provete com o eixo de aplicação de força axial da máquina.

- Alinhamento do provete com os suportes

Este alinhamento é feito com o auxílio de um paquímetro, que permite medir a distância entre o provete e os seus suportes. Com esta medição, que deverá apresentar o mesmo valor para cada suporte em relação ao provete, consegue-se assim um perfeito alinhamento do provete com os seus suportes. As distâncias medidas encontram-se representadas na Figura A.13.

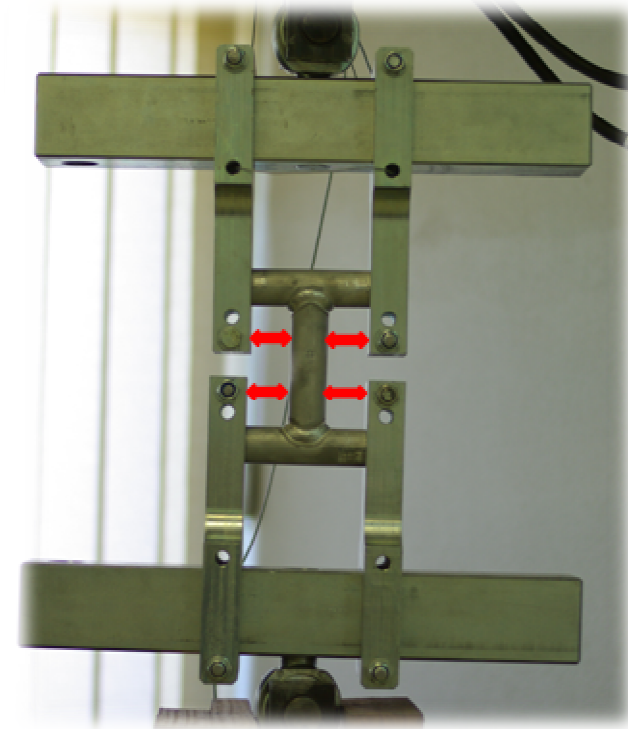


Figura A.13 - Alinhamento do provete com os suportes.

- Colocação do provete na posição y

Para a colocação do provete relativamente à sua posição em y, é utilizado um paquímetro digital. A cota y medida é a dimensão entre os suportes do provete e o corpo da amarra, estando esta assinalada na Figura A.14. Este desalinhamento em relação ao eixo y.

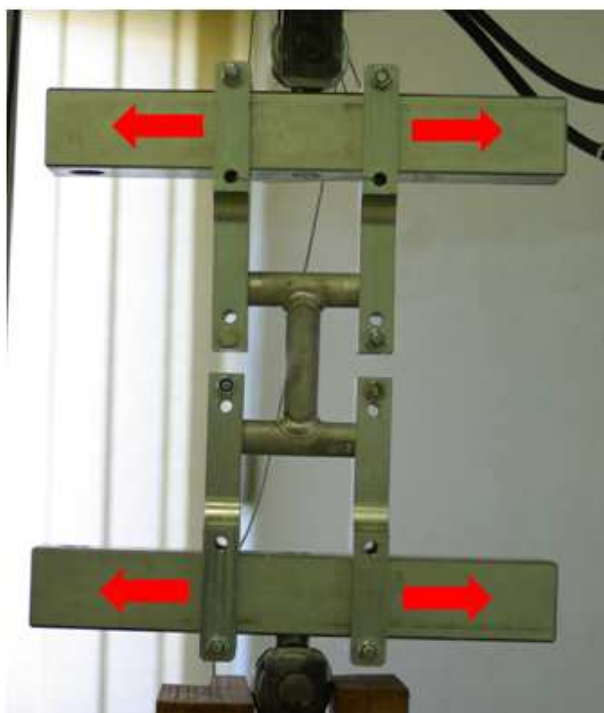


Figura A.14 - Colocação do provete na posição y.

- Colocação do provete na posição z

Para a colocação do provete na posição pretendida, é utilizada uma escala e um paquímetro. Esta operação requer que os parafusos dos suportes do provete se encontrem livres, de modo a que estes possam sofrer rotação. A verificação desta cota tem de ser feita na zona dos suportes inferiores e superiores, pois apenas assim se consegue garantir que o provete se encontra completamente alinhado, mantendo a cota z pretendida. A dimensão medida na colocação desta cota encontra-se representada na Figura A.15.

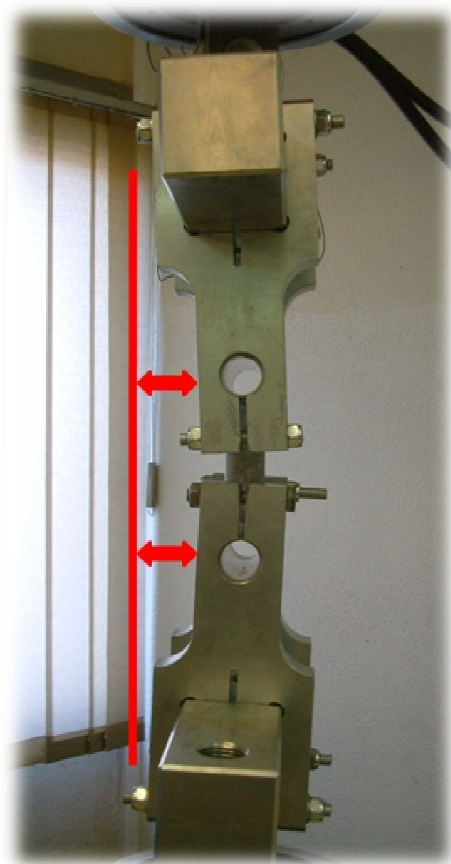


Figura A.15 - Colocação do provete na posição z.

Após toda esta sequência de etapas, pode assim dar-se início ao ensaio ao provete. Para cada ensaio terão de ser modificados os posicionamentos do provete relativamente à cota em y e em z, pois cada ensaio tem o seu valor específico. No entanto não é necessário a retirar o provete para a realização do novo ensaio, sendo apenas necessário desapertar os parafusos dos suportes das amarras.

Anexo IV

Desenhos do Sistema de Amarras

Anexo V

Preparação de Agente de Contrastação

Para a observação das amostras polidas ao microscópio metalográfico foi necessário proceder à sua contração. Na Tabela A.7 encontram-se associados aos vários tipos de ligas de alumínio, os diferentes agentes de contração, e na Tabela A.8, a sua composição e o seu respectivo modo de preparação.

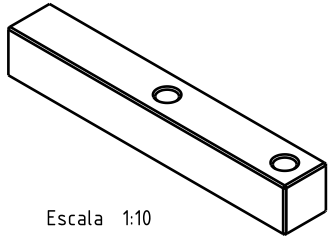
Tabela A.7 - Escolha do agente contrastante [20].

Alloy	Etchant
High-purity aluminum	4 or 5
Commercial-purity aluminum:	
1xxx series	1, 2, or 4
All high-copper alloys:	
2xxx series and casting alloys	1, 6, or 7
Al-Mn alloys:	
3xxx series	1, 2, 4, or 6
Al-Si alloys:	
4xxx series and casting alloys(a)	2, 3, 4, or 8
Al-Mg alloys:	
5xxx series and casting alloys	1, 2, 4, or 6
Al-Mg-Si alloys:	
6xxx series and casting alloys	1, 2, 4, or 6
Al-Cu-Mg-Zn alloys:	
7xxx series and casting alloys	1 or 6
(a) Also welds and brazed joints made with the use of these alloys as filler metals	

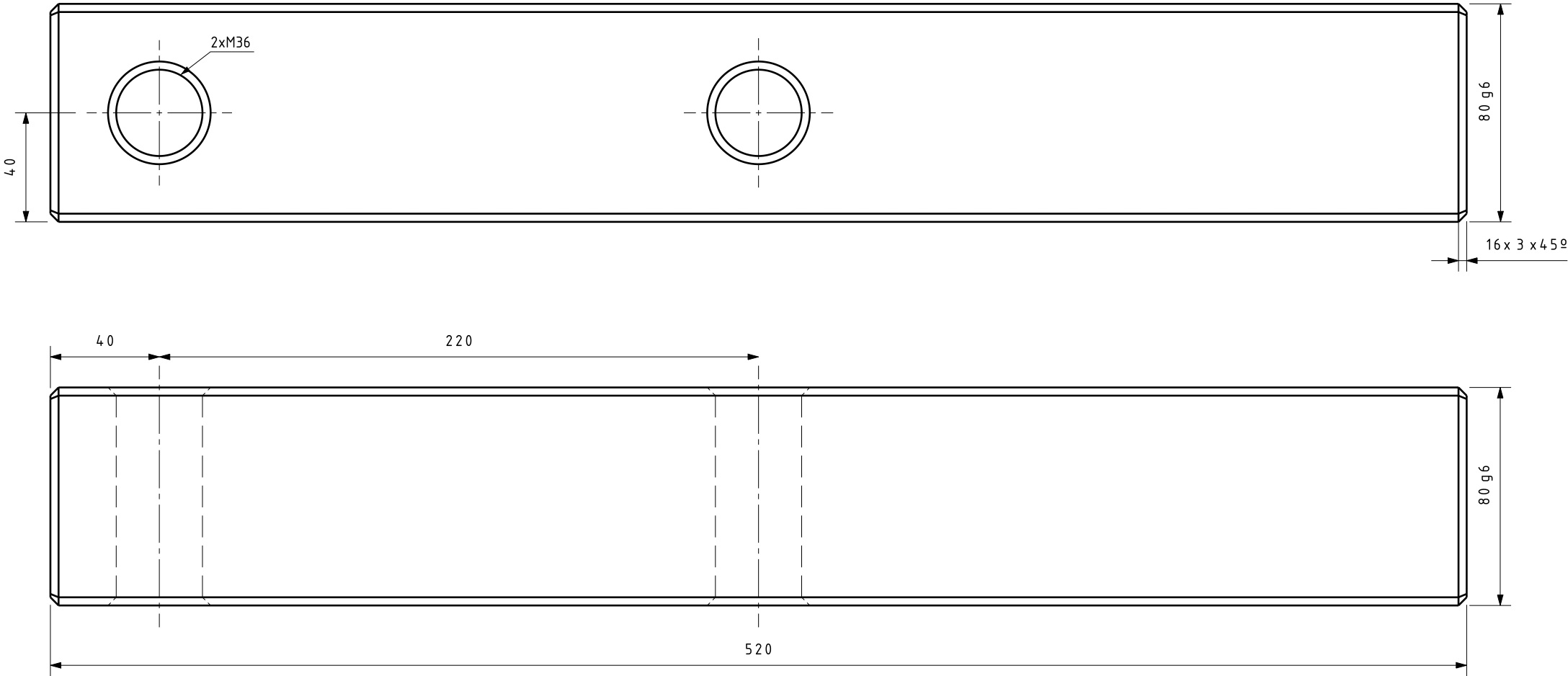
Após consulta da Tabela A.7 foi escolhido o agente contrastante 6 tendo em conta o tipo de liga de alumínio utilizada (6061). O agente contrastante trata-se de uma mistura de ácido nítrico (HNO₃) e de água na proporção de 25:75 respectivamente.


Tabela A.8 - Preparação do agente contrastante [20].

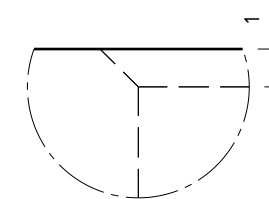
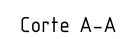
Etchant	Composition	Procedure for use
1 (HF etch)	1 mL HF (48%), 200 mL H ₂ O	Swab for 15 s or immerse for 30–45 s
2	1 g NaOH, 100 mL H ₂ O	Swab for 5–10 s
3A (Keller's reagent)	2 mL HF (48%), 3 mL HCl (conc), 5 mL HNO ₃ (conc), 190 mL H ₂ O	Immerse for 8–15 s, wash in stream of warm water, blow dry. Do not remove etching products from surface.
3B (dilute Keller's reagent)	20 mL etchant 3A, 80 mL H ₂ O	Mix fresh before using. Immerse specimen for 5–10 s.
4 (modified Keller's reagent) ..	2 mL HF (48%), 3 mL HCl (conc), 20 mL HNO ₃ (conc), 175 mL H ₂ O	Immerse for 10–60 s, wash in stream of warm water, blow dry. Do not remove etching products from surface.
5 (Barker's reagent)	4 to 5 mL HBF ₄ (48%), 200 mL H ₂ O	Electrolytic: use aluminum, lead, or stainless steel for cathode; specimen is anode. Anodize 40–80 s at approximately 0.2 A/cm ² (1.3 A/in. ² , or about 20 V dc). Check results on microscope with crossed polarizers.
6	25 mL HNO ₃ (conc), 75 mL H ₂ O	Immerse in solution at 70 °C (160 °F) for 45–60 s.
7	20 mL H ₂ SO ₄ (conc), 80 mL H ₂ O	Immerse at 70 °C (160 °F) for 30 s; rinse in cold water.
8	10 mL H ₃ PO ₄ (85%), 90 mL H ₂ O	Immerse at 50 °C (120 °F) 1 min or 3–5 min (see Table 4).
9	5 mL HF (48%), 10 mL H ₂ SO ₄ , 85 mL H ₂ O	Immerse for 30 s.
10	4 g KMnO ₄ , 2 g Na ₂ CO ₃ , 94 mL H ₂ O, a few drops wetting agent	Specimen surface must be well polished and precleaned in 20% H ₃ PO ₄ at 95 °C (205 °F) for uniform wettability. After precleaning, rinse in cold water and immediately immerse in etchant for 30 s.
11	2 g NaOH, 5 g NaF, 93 mL H ₂ O	Immerse for 2–3 min.
12	50 mL Poulton's reagent (etchant 4 in Table 1), 25 mL HNO ₃ (conc), 40 mL of solution of 3 g chromic acid per 10 mL of H ₂ O	Put a few drops on as-rolled or as-extruded surface for 1–4 min, rinse, and swab to desmut. Examine on microscope with crossed polarizers to show grains. Repeat etching, if necessary. For some 5xxx alloys, increase HNO ₃ in solution to 50 mL.
13	8 mL HNO ₃ (conc), 2 mL HCl (conc), 45 mL H ₂ O, 45 mL methanol	Immerse for 10 s.
14	5 mL acetic acid (glacial), 1 mL HNO ₃ (conc), 94 mL H ₂ O	Immerse for 20–30 min.
15 (Graff/Sargent reagent)	15.5 mL HNO ₃ (conc), 0.5 mL HF (48%), 3.0 g CrO ₃ , 84.0 mL H ₂ O	Mix fresh before using. Use at room temperature. Immerse sample and agitate mildly for 20–60 s. A second etching in Keller's reagent may further develop the structure.



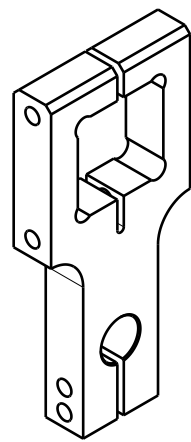
Escala 1:10




			 IPS Instituto Politécnico de Setúbal	Escola Superior de Tecnologia Setúbal	Paulo Machado Nº 070266008
Escala 1/2	Amarra				Desenho Nº 01
Tol. ISO 2768-m					

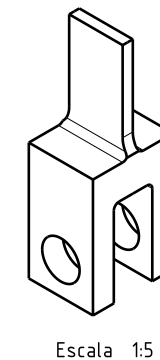
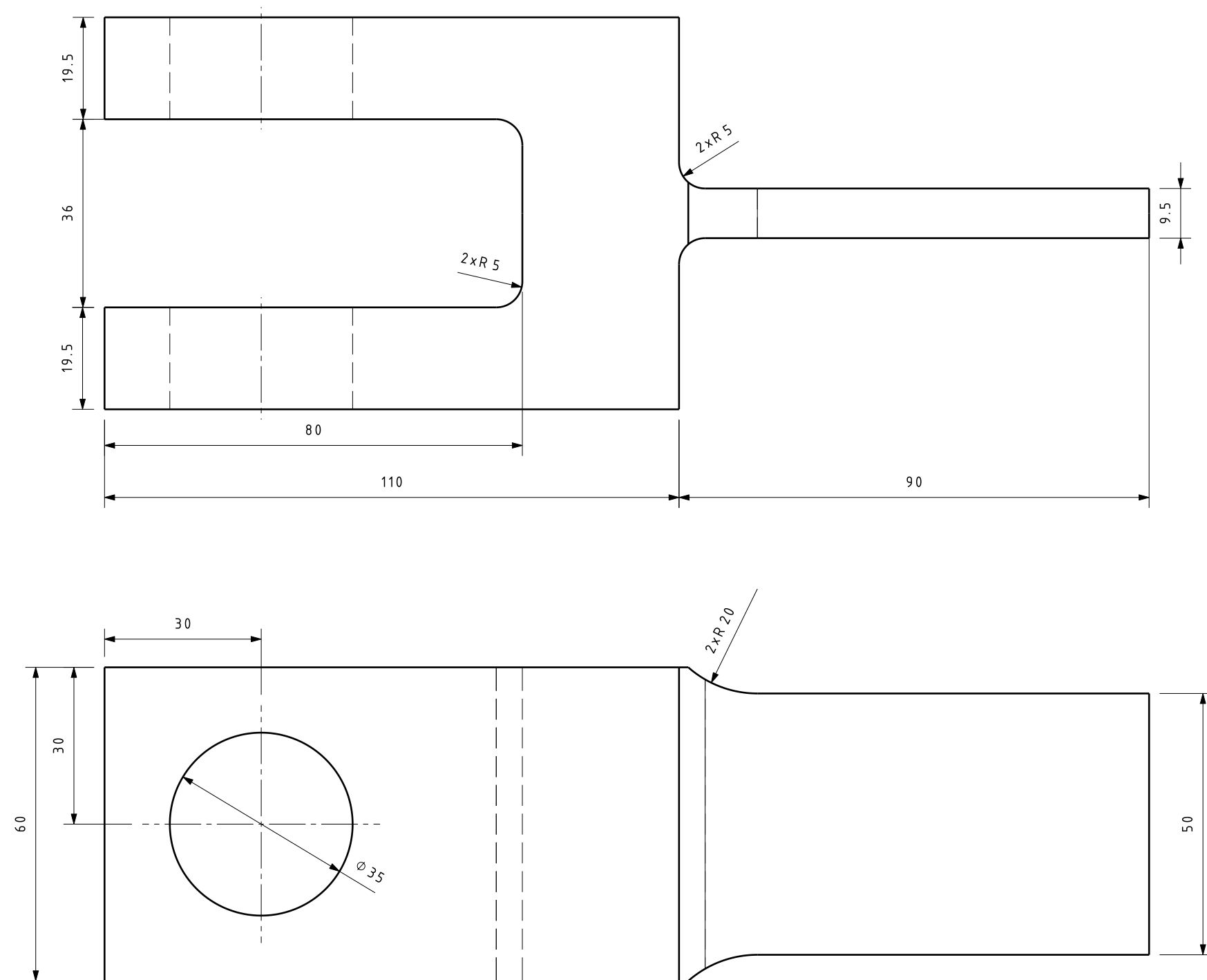



Detalhe C
Escala 5:1

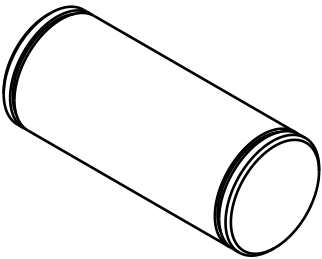


Escala 1:5

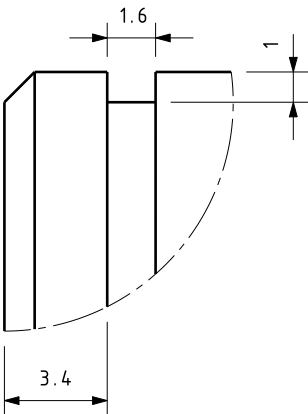
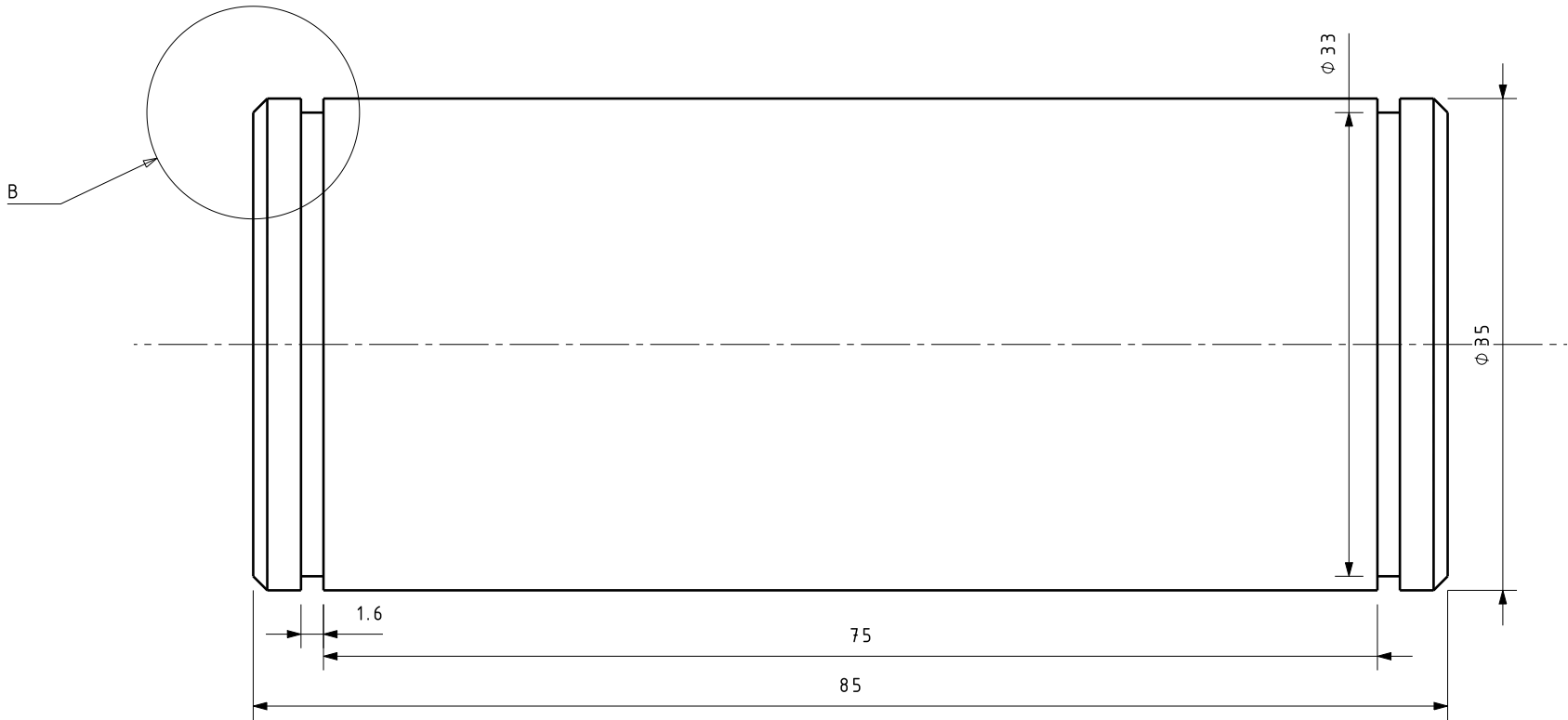
			 <div>Escola Superior de Tecnologia Setúbal</div>	Paulo Machado Nº 070266008						
Escala 1/2	Suporte Provete			Desenho Nº 02						
Tol. ISO 2768-m										




			 IPS Instituto Politécnico de Setúbal	Escola Superior de Tecnologia Setúbal	Paulo Machado Nº 070266008					
Escala 1/1	Acoplamento Máquina				Desenho Nº 03					
Tol. ISO 2768-m										

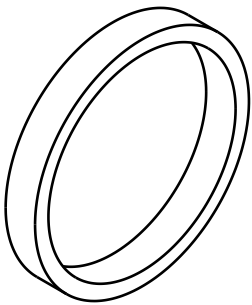


Escala 1:2

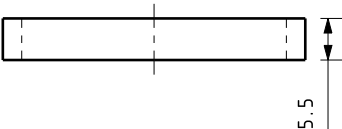
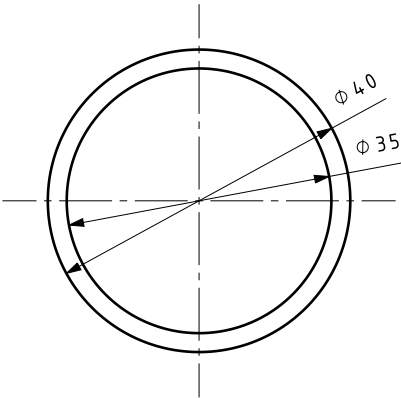


Detalhe B
Escala 4:1

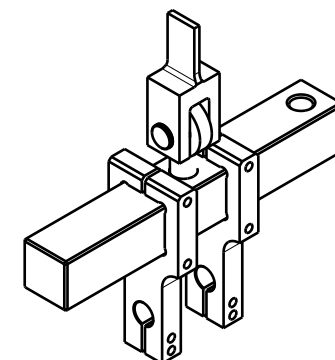
			 IPS Instituto Politécnico de Setúbal	Escola Superior de Tecnologia Setúbal	Paulo Machado Nº 070266008					
Escala 2/1	Pino				Desenho Nº 04					
Tol. ISO 2768-m										



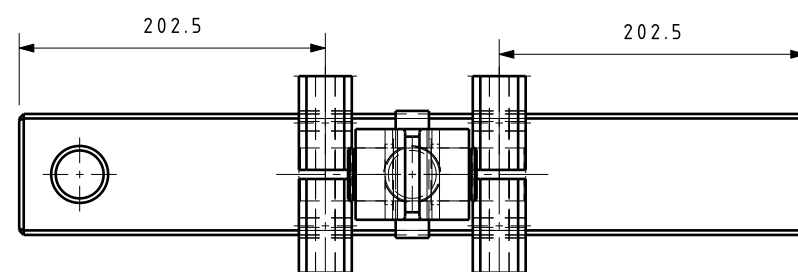
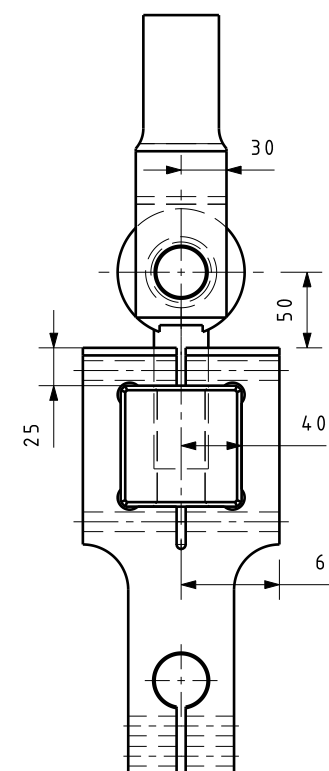
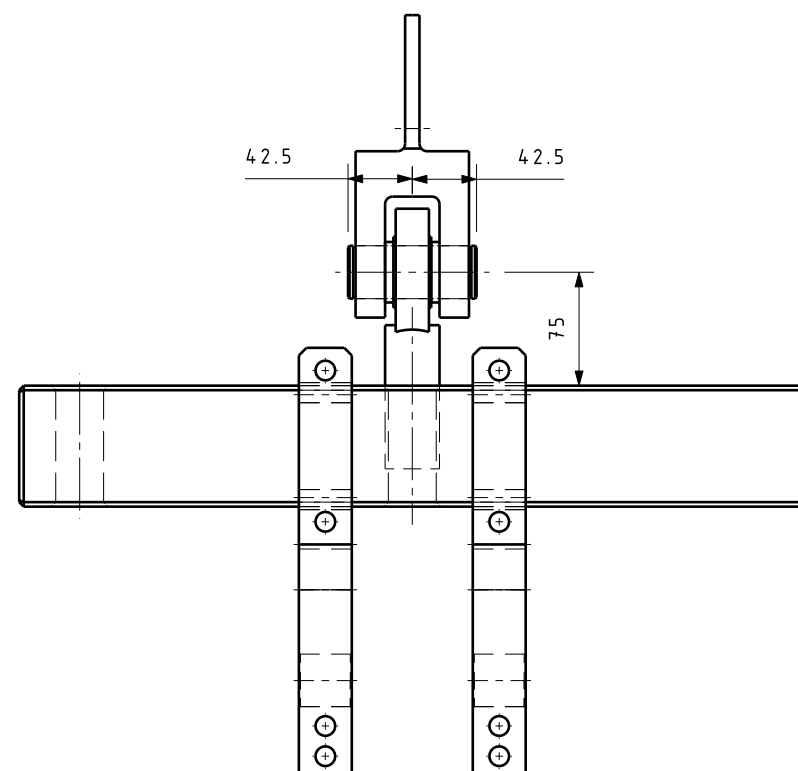
Escala 1:1




			 <div>Escola Superior de Tecnologia Setúbal</div>	Paulo Machado Nº 070266008						
Escala 1/1	Anel Espaçador			Desenho Nº 05						
Tol. ISO 2768-m										



Escala 1:10



				Paulo Machado Nº 070266008					
Escala 1/5	Conjunto			Desenho Nº 06					